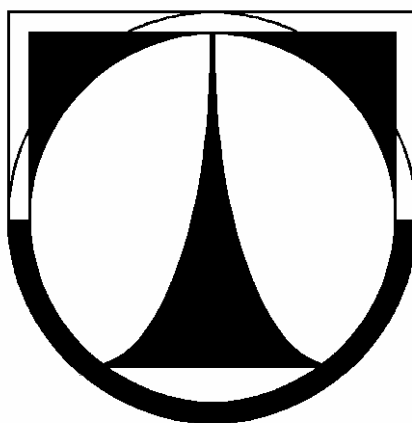


**Technická univerzita v Liberci**  
**Fakulta strojní**



**Bc. Petr Hons**

**Studie náročnosti a efektivnosti vývoje prototypového  
modelu v závislosti na použité technologii a materiálu.**

**Diplomová práce**

**2007**

Technická univerzita v Liberci

Fakulta strojní

Katedra výrobních systémů

Obor: 2301T030 Výrobní systémy

Zaměření: Pružné výrobní systémy pro strojírenskou výrobu

**Studie náročnosti a efektivnosti vývoje prototypového modelu  
v závislosti na použité technologii a materiálu.**

**Study of prototype model development and its difficulty and  
efficiency according to selected technology and material.**

**KVS - VS - 175**

**Bc. Petr Hons**

Vedoucí práce: Prof. Ing. Přemysl Pokorný, CSc.

Počet stran:	86
Počet příloh:	0
Počet obrázků:	58
Počet tabulek:	6
Počet modelů nebo jiných příloh:	6

V Liberci 23.5.2007

**TÉMA:** Studie náročnosti a efektivnosti vývoje prototypového modelu v závislosti na použité technologii a materiálu.

**ANOTACE:**

Práce shrnuje informace o technologiích rapid prototyping a praktické poznatky z použití těchto technologií. Práce obsahuje ilustrační obrázky, fotografie, tabulky i fyzické modely vztahující se na konkrétní návrh prototypu určeného výrobku. Je uvedeno hodnocení vhodnosti uplatnění technologie na určený výrobek i ekonomické náročnosti.

**THEME:** Study of prototype model development and its difficulty and efficiency according to selected technology and material.

**ANNOTATION:**

The work summarises information on technologies of rapid prototyping and practical experience from using these technologies. Work includes illustrative pictures, photos, tables and physical models related to determined design of specified product prototype. An assessment of the technology applicability for this specified product prototype is introduced with its economy analysis.

Desetinné třídění:

Klíčová slova:

RAPID PROTOTYPING, TECHNOLOGIE, MODEL

Zpracovatel:

TU v Liberci, Fakulta strojní, Katedra výrobních systémů

Dokončeno:

2007

Archivní označení zprávy:

Počet stran: 86

Počet příloh: 0

Počet obrázků: 58

Počet tabulek: 6

Počet modelů  
nebo jiných příloh: 6

## Prohlášení

Byl jsem seznámen s tím, že na mou diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 o právu autorském, zejména § 60 (školní dílo) a § 35 (o nevýdělečném užití díla k vnitřní potřebě školy).

Beru na vědomí, že TUL má právo na uzavření licenční smlouvy o užití mé práce a prohlašuji, že **souhlasím** s případným užitím mé práce (prodej, zapůjčení apod.).

Jsem si vědom toho, že užít své diplomové práce či poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem TUL, která má právo ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, vynaložených univerzitou na vytvoření díla (až do její skutečné výše).

Datum: 23.5.2007

Podpis: \_\_\_\_\_

### **Místopřísežné prohlášení**

Místopřísežně prohlašuji, že jsem diplomovou práci vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury pod vedením vedoucího diplomové práce.

V Liberci 23.5.2007

-----

## **OBSAH:**

<b>1.</b>	<b>ÚVOD.....</b>	<b>9</b>
<b>2.</b>	<b>RAPID PROTOTYPING .....</b>	<b>10</b>
<b>3.</b>	<b>DIGITÁLNÍ 3D OBJEKT. ....</b>	<b>13</b>
<b>4.</b>	<b>DIGITALIZACE.....</b>	<b>15</b>
4.1.	KONTAKTNÍ 3D SKENERY.....	16
4.2.	OPTICKÉ 3D SKENERY. ....	18
4.3.	LASEROVÉ 3D SKENERY. ....	21
4.4.	DESTRUKTIVNÍ 3D SKENERY. ....	24
4.5.	DALŠÍ PRINCIPY 3D SKENERŮ. ....	25
<b>5.</b>	<b>MODELOVÁNÍ 3D VRSTVENÍM MATERIÁLU.....</b>	<b>26</b>
5.1.	STEREOLITOGRAFIE ( SLA ).....	27
5.2.	SOLID GROUND CURING (SGC). ....	32
5.3.	SELECTIVE LASER SINTERING ( SLS ).....	35
5.4.	LAMINATED OBJECT MANUFACTURING (LOM), SELECTIVE ADHESIVE AND HOT PRESS (SAHP). ....	38
5.5.	FUSED DEPOSITION MODELLING ( FDM ).....	41
5.6.	THREE DIMENSIONAL PRINTING ( 3DP ).....	45
5.7.	BALLISTIC PARTICLE MANUFACTURING ( BPM ) .....	49
5.8.	MULTIPHASE JET SOLIDIFICATION ( MJS ) .....	51
5.9.	MULTI JET MODELLING ( MJM ).....	51
5.10.	POLYJET™ TECHNOLOGY .....	52
5.11.	METODY RYCHLÉ VÝROBY PROTOTYPŮ VE STÁDIU VÝVOJE .....	54
5.11.1.	LASER ENGINEERED NET SHAPING (LENS) .....	54
5.11.2.	KONCEPCE KONTROLOVANÉ AUTOMATICKÉ VÝROBY (DESCAF).....	55
5.11.3.	QUADRA SYSTEM .....	55
5.11.4.	ELECTROSETTING MATERIAL .....	55
5.11.5.	CNC DEPOSITION METHOD .....	55
5.11.6.	INKJET-BASED.....	56
5.11.7.	WELD DEPOSITION .....	56
5.11.8.	MASKED DEPOSITION .....	56
5.11.9.	LASER FUSING .....	57
<b>6.</b>	<b>RYCHLÁ VÝROBA FOREM – RAPID TOOLIG. ....</b>	<b>58</b>
<b>7.</b>	<b>ZHOTOVENÍ KONKRÉTNÍHO MODELU. ....</b>	<b>60</b>
7.1.	VIRTUÁLNÍ 3D MODEL.....	60
7.2.	ZPRACOVÁNÍ DAT PRO METODOU FDM. ....	63
7.3.	VYTVOŘENÍ MODELU METODOU FDM. ....	67
7.4.	ZPRACOVÁNÍ DAT PRO METODOU 3DP.....	69
7.5.	VYTVOŘENÍ MODELU METODOU 3DP.....	70
<b>8.</b>	<b>POROVNÁNÍ VYTVOŘENÝCH MODELŮ METODOU FDM A METODOU 3DP.....</b>	<b>72</b>
8.1.	EKONOMICKÝ ROZBOR TVORBY MODELŮ. ....	72
8.2.	ROZBOR VLASTNOSTÍ ZHOTOVENÝCH MODELŮ.....	75
<b>9.</b>	<b>TVORBA ODLITKŮ V SILIKONOVÉ FORMĚ. ....</b>	<b>77</b>
<b>10.</b>	<b>TVORBA KOVOVÝCH ODLITKŮ. ....</b>	<b>81</b>
<b>11.</b>	<b>ZÁVĚR.....</b>	<b>83</b>
	<b>SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....</b>	<b>84</b>
	<b>INTERNETOVÉ ODKAZY.....</b>	<b>85</b>
	<b>SEZNAM PŘÍLOH A MODELŮ.....</b>	<b>86</b>

## **Seznam použitých zkratek a symbolů.**

<b>3DP</b>	3-Dimensional Printing [TM of Massachusetts Institute of Technology]
<b>ABS</b>	acrylonitrile butydiene styrene plastic
<b>ACES</b>	Accurate Clear Epoxy Solid [TM of 3D Systems]
<b>ADM</b>	Advanced Digital Manufacturing [TM of 3D Systems]
<b>BPM</b>	ballistic particle manufacturing
<b>BUT</b>	Brno University of Technology
<b>CAD</b>	computer-aided design Počítačem podporované konstruování
<b>CAE</b>	computer-aided engineering Počítačem podporované inženýrské výpočty
<b>CAI</b>	Computer Aided Inspection - Proces ověřování technologie
<b>CAM</b>	computer-aided manufacturing - Počítačem podporovaná výroba součástí
<b>CCD</b>	Complementary charge device – Snímací čip (senzor) obrazu
<b>CMM</b>	Control Measuring Machine
<b>CNC</b>	computer numerical control číslicově řízený stroj
<b>EFAB</b>	Electrochemical Fabrication [TM of Microfabrica Inc.]
<b>DCM</b>	Direct Composite Manufacturing [TM of 3D Systems]
<b>DesCAF</b>	Koncepce kontrolované automatické výroby
<b>DLF</b>	directed light fabrication [TM of Los Alamos National Laboratory]
<b>DMD</b>	1) Direct Metal Deposition [TM of POM Group]; 2) deformable mirror device
<b>DMDS</b>	Directed Metal Deposition System [TM of Optomec]
<b>DMLS</b>	Direct Metal Laser Sintering [TM of EOS GmbH] dpi dots per inch Rozlišení udávané například i tiskových zařízení
<b>DPS</b>	1)Direct Photo Shaping [TM of SRI Int'l.] 2)Deska plošných spojů
<b>DPI</b>	Dots per inch, počet bodů na palec
<b>DSPC</b>	Direct Shell Production Casting [TM of Soligen]
<b>DTM</b>	desktop manufacturing
<b>EBM</b>	Electron Beam Melting [TM Arcam AB]
<b>FDC</b>	fused deposition of ceramics
<b>FDM</b>	fused deposition modeling [TM of Stratasys]
<b>FEM</b>	Finite Element Method, Metoda konečných prvků
<b>FFF</b>	freeform fabrication
<b>FFM</b>	freeform manufacturing
<b>GARPA</b>	Global Alliance of Rapid Prototyping Associations
<b>GPD</b>	gas phase deposition
<b>HP</b>	Hewlett-Packard
<b>IGES</b>	Initial Graphic Exchange Specification
<b>LAM</b>	Laser Additive Manufacturing [TM of AeroMet Corp.]
<b>LCVD</b>	laser-assisted chemical vapor deposition

<b>LENS®</b>	Laser Engineered Net Shaping (TM)[Registered trademarks of Sandia National Labs. and Sandia Corp.]
<b>LM</b>	Laminated Manufacturing – metoda RP
<b>LMJP</b>	liquid metal jet printing
<b>LOM</b>	laminated object manufacturing
<b>MICE</b>	mesoscopic integrated conformal electronics
<b>MJM</b>	MultiJet Modeling [TM of 3D Systems, Inc.]
<b>MJS</b>	Multiphase Jet Solidification [TM of Fraunhofer Inst.]
<b>MKP</b>	Metoda konečných prvků
<b>MM</b>	ModelMaker [TM of Solidscape]
<b>MSDM</b>	mold shape deposition manufacturing
<b>PHAST</b>	Prototype Hard And Soft Tooling [TM of Procter and Gamble and Milwaukee School of Engineering]
<b>PDM</b>	Product Data Management - systém správy dat
<b>PLT</b>	Paper Lamination Technology [TM of Kira Corp.]
<b>PTC</b>	Persona compute tomography
<b>RBC</b>	Robocasting [TM of Sandia National Laboratories]
<b>RE</b>	reverse engineering
<b>RFP</b>	rapid freeze prototyping / rapid freezing prototyping
<b>RM</b>	rapid manufacturing
<b>RP</b>	rapid prototyping
<b>RPML</b>	rapid prototyping mailing list
<b>RSP</b>	rapid solidification process
<b>RT</b>	rapid tooling Rychlá výroba forem
<b>SAHP</b>	Selective Adhesive and Hot Press
<b>SALD</b>	selective area laser deposition
<b>SALDVI</b>	selective area laser deposition vapor infiltration
<b>SCS</b>	Solid Creation System [TM of Sony/D-MEC]
<b>SDM</b>	shape deposition manufacturing
<b>SFF</b>	solid freeform fabrication
<b>SGC</b>	Solid Ground Curing [TM Cubital]
<b>SL, SLA</b>	stereolithography Technologie RP - stereolitografie
<b>SLM</b>	selective laser melting
<b>SLS</b>	selective laser sintering
<b>SOUP</b>	Solid Object Ultraviolet Laser Plotter [TM of CMET]
<b>STAT</b>	Sample Time Acceleration Technology [TM of Catalyst PDG, Inc.]
<b>STEP</b>	Standard for the Exchange of Product Model Data Výměnný formát dat stp
<b>STL</b>	stereolithography file format Výměnný formát dat stl



## **1. Úvod.**

Rozvoj průmyslové výroby a stále se zvětšující nároky na jakost a cenu vyráběných produktů kladou stále větší důraz na inovaci projektového a výrobního procesu. Nedílnou součástí této inovace je používání nových technologií a postupů. Orientace ve stále se zdokonalujících technologiích a vhodnost jejich použití je velmi důležitým aspektem rozvoje každé prosperující firmy.

Na jakost a cenu produktu má vliv mnoho činitelů. Mezi tyto činitele patří idea, koncepce, efektivní a rychlý vývoj, ekonomická a pružná výroba, kontrola jakosti, plánování a marketing.

Tato studie se zabývá problematikou rychlé realizace prototypů. Studie v sobě shrnuje postupy a technologie používané v oblasti rychlého vývoje prototypů a dále se zabývá kvalitativním a cenovým hodnocením těchto technologií. Studie obsahuje ilustrační fotografie a praktické poznatky. K práci jsou přiloženy vyhotovené modely na jejichž realizaci byly použity různé technologie výroby prototypů.

### **Hlavní cíle této práce:**

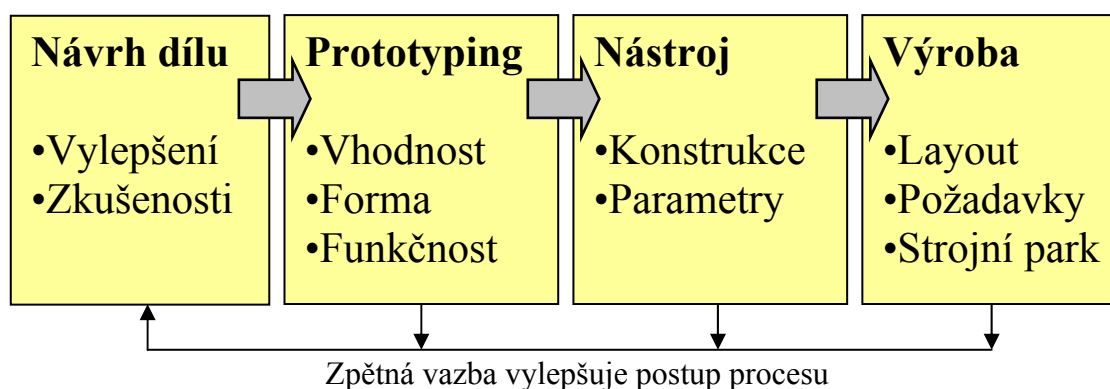
- Studie používaných technologií rychlého vývoje prototypu.
- Zhotovení virtuálního 3D modelu.
- Vyhotovení reálného modelu různými technologiemi.
- Porovnání vlastností a parametrů modelů.
- Zhodnocení pracovní a finanční náročnosti použitých technologií.
- Návrh výpočtu srovnávací sazby pro tvorbu ceny technologie.
- Praktické zkušenosti

## 2. Rapid Prototyping

RAPID PROTOTYPING je rychlý vývoj prototypu, tedy postup vývoje od návrhu ideje po vytvoření fyzického modelu. Jedná se o takové technologie, které automatizují proces pro výrobu 3-rozměrných, celistvých objektů ze surových materiálů.

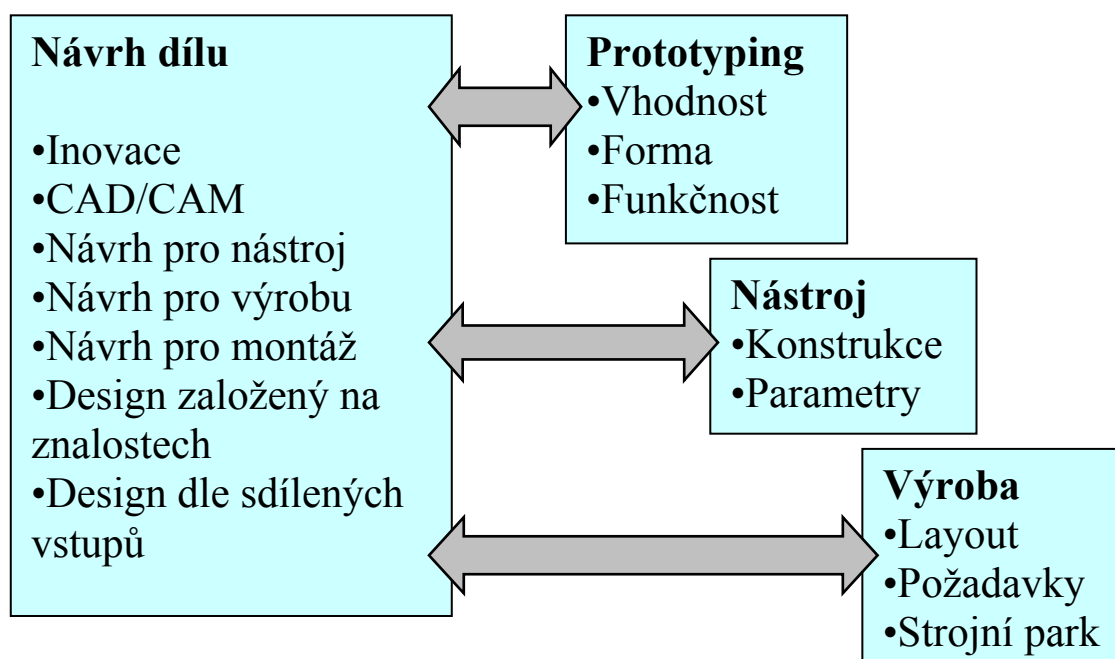
Stále se zvyšující nároky na rychlost vývoje, výroby a uvedení na trh spolu s nároky na snížení vývojových a výrobních nákladů způsobují přechod od tradičních výrobních procesů k integrovaným výrobním procesům.

**Tradiční výrobní proces nového dílu:**



Obr.1 Tradiční výrobní proces nového dílu

**Integrovaný výrobní proces:**



Obr.2 Integrovaný výrobní proces

Rapid Prototyping (dále jen RP) slouží k co nejrychlejší tvorbě prototypů a modelů. Vyvíjí se již od osmdesátých let, kdy vznikla metoda stereolitografie. Nyní tvorba modelů a prototypů směřuje především do oblasti výroby forem a nástrojů. Na významu nabývá také oblast koncepčního konstruování, kdy se ověřují definované vlastnosti budoucího výrobku. Ve specifických případech se modely vybudované pomocí RP využívají k simulacím a k zkouškám jejich vlastností jako je výrobitelnost, zástavba a rozměrová kompatibilita v daném produktu, estetika, aerodynamika, mechanické namáhání, apod.

Velké úsilí je věnováno zdokonalení softwarových i hardwarových technologií, které by umožnili provádět celý vývojový proces výrobku na digitálním modelu přímo v CAD systému. Např. vizualizace, renderování, virtuální realita, MKP, dynamické analýzy atd. Potřebou současných designérů a konstruktérů je pracovat také s modelem fyzickým, u kterého se dá snadněji měnit design, odstraňovat případné chyby, kontrolovat smontovatelnost, opravitelnost, ergonomie nebo provádět funkční zkoušky. Všechny tyto výhody fyzického modelu vedou ke zrychlení celého procesu vývoje výrobku. Výroba modelů a prototypů klasickými technologiemi je náročná a zdoluhavá což zpomaluje a prodražuje vývoj. Jednou z vhodných metod, která splňuje většinu požadavků konstruktéra je Rapid Prototyping. Tato technologie urychluje vývoj a umožňuje přímou vazbu na vývojové prostředí jako jsou CAD/CAM systémy, které urychlují vývoj, přípravu výroby a samotnou výrobu nejen jednotlivých výrobků ale i celých montážních skupin. V kombinaci s metodami přesného lití kovů a tvorby plastových odlitků poskytují metody RP možnost rychlejší a levnější výroby funkčních modelů a prototypů.

Rapid Prototyping se využívá ve strojírenství, v automobilovém, leteckém a elektrotechnickém průmyslu i ve výrobě spotřebního zboží. Ve všech oblastech se docílilo zkrácení vývojových časů, snížení nákladů a zvýšení jakosti výrobku.

Metody Rapid Prototyping jsou článkem v dlouhém řetězci vytváření a modifikací dat týkajících se daného výrobku. První fáze začíná vytvořením digitálního modelu který nese informace o geometrii ve 3D souřadnicích. Dále se data použijí pro různé analýzy jako je metoda MKP pro pevnostní analýzu, software vyšetřující kinematické a dynamické závislosti, atd. Z těchto programů vyjdou data o výrobku, která se dále mohou poslat buď do CNC obráběcích center, odkud dostaneme hotový fyzický model, nebo s nimi můžeme vstoupit do technologie RP.

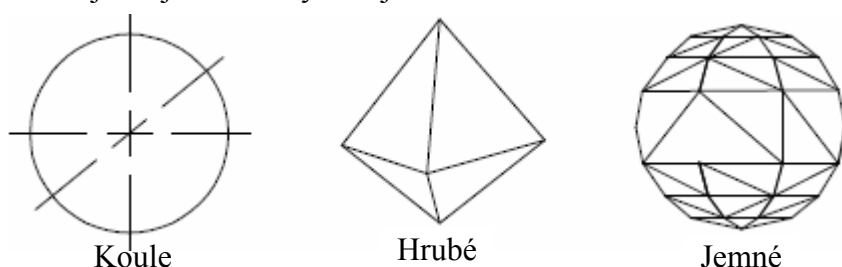
Aby mohl být fyzický model vytvořen, musí vstupní data nést úplné informace o geometrii tělesa. Ideálním případem je popis objektu pomocí objemových entit. Použitím softwarových nástrojů lze přepracovat i data z 2D CAD systémů do systémů 3D.

V další fázi jsou data o objektu aproximována pomocí trojúhelníků (triangulace). Parametry triangulace ovlivňují výslednou přesnost modelu. Tyto parametry lze nastavit (např. Chord Height je maximální přípustná tangenciální chyba v mm. Angle Control určuje maximální přípustný úhel mezi dvěma trojúhelníky).

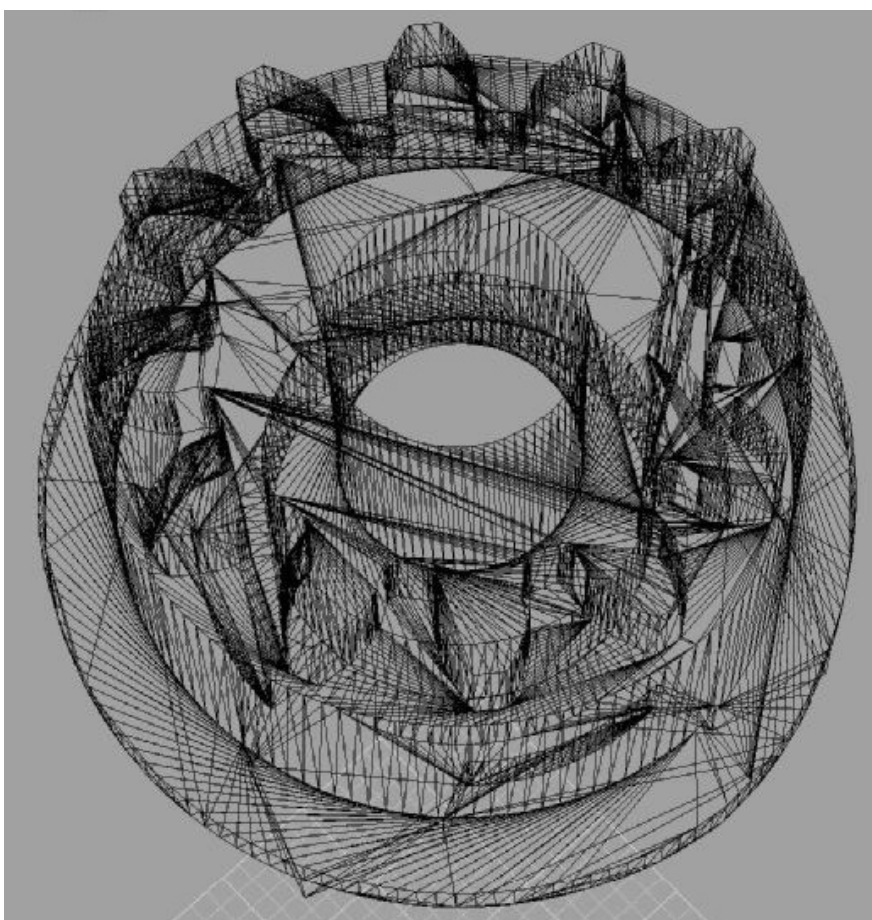
Dalším krokem je převedení dat do standardizovaného formátu. Nejčastěji se používá formát STL. Většina moderních CAD/CAM systémů nabízí uložení dat do tohoto formátu. Data jsou dále zpracována speciálním softwarem dodávaným se systémy pro RP, který speciálním výpočtovým postupem rozloží 3D geometrii na jednotlivé příčné řezy definované výšky (Slicen, SLI formát). Obvyklá výška vrstev je 0,1 až 0,2 mm. S takovým softwarem je možné vykonávat ještě celou řadu pomocných operací jako např. stanovení měřítka rozměrů součásti, zkoušení a oprava chybných STL dat nebo navržení podpůrné konstrukce (vyžaduje např. Stereolitografie z důvodů pozdějšího oddělení součástky od nosné desky nebo podepření a fixaci součástky v průběhu procesu vytváření modelu). Údaje o takto vytvořených řezech jsou přímo odeslány do výrobního zařízení pro RP, kde z těchto řezů je sestaven fyzický model.

### 3. Digitální 3D objekt.

Všechny hmotné objekty kolem nás jsou tvořeny hmotou která je rozprostřena v třírozměrném prostoru. V technické praxi prostor umísťujeme do kartézské souřadnicové soustavy jejíž osy značíme x,y,z nebo do jiných trojrozměrných prostorů které jsou vzájemně transformovatelné. Chceme-li daný objekt zobrazit nebo vytvořit musíme mít informaci o prostorovém umístění hmoty a struktuře objektu. Tyto informace nazýváme 3D digitálním objektem. Realističnost tedy přesnost s jakou byl daný model vytvořen je velmi závislá na struktuře modelu, na množství a přesnosti dat. Příkladem může být obrázek 3 na kterém je zachycena koule a interpretace jejího povrchu pomocí trojúhelníků v hrubém a jemném rozlišení. Na dalším obrázku 4 je zobrazen složitější objekt složený z trojúhelníků.



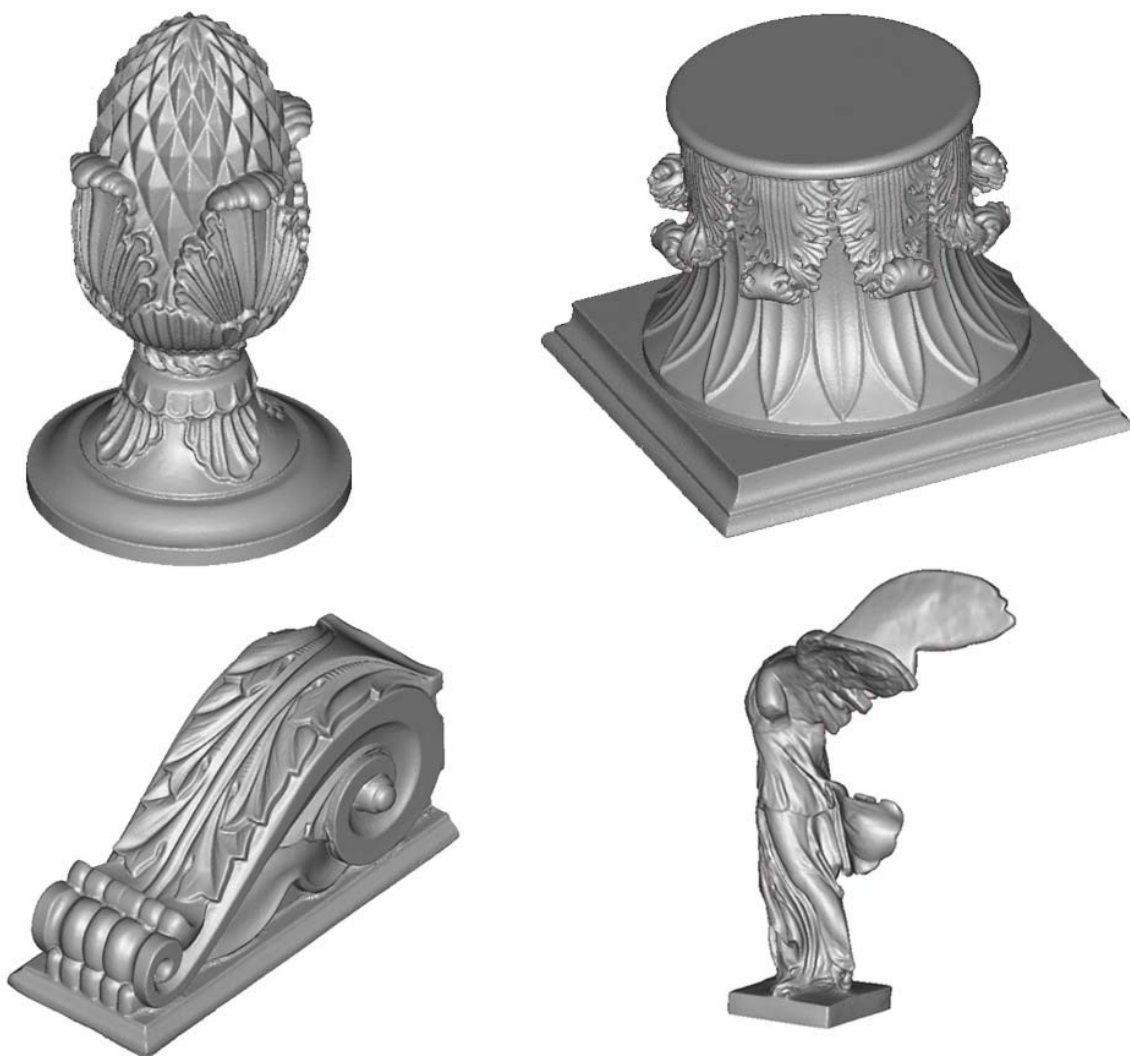
Obr.3 Koule a interpretace jejího povrchu pomocí trojúhelníků



Obr.4 Objekt složený z trojúhelníků

Digitální model lze vytvořit dvěma způsoby. První způsob je vytvoření modelu pomocí modeléru tedy pomocí uceleného nástroje pro tvorbu 3D modelu. Tento nástroj sestává z programu pro tvorbu 3D modelu a hardwaru včetně vizuálních, komunikačních a ovládacích prvků. Konkrétně lze zmínit CAD systémy, programy PROENGINEER, CATIA, ARCHICAD, LIGHTWARE, STUDIO 3D MAX atd. Tento způsob tvorby modelu je časově náročný. Nemusí přesně reprezentovat reálný objekt nebo dokonce může reprezentovat objekt který v daném čase ještě neexistuje.

Druhým způsobem je vytvoření 3D modelu pomocí digitizérů, tedy zařízení která získají potřebná data o reálném objektu digitalizační metodou. Tento způsob je mnohem rychlejší a efektivnější než tvorba pomocí modeléru. Nutnou podmínkou pro tento proces je fyzická existence a dostupnost digitalizovaného objektu. Proces digitalizace reálného objektu do 3D dat má odborný název Reverse Engineering.



Obr.5 Digitalizované objekty

## **4. Digitalizace.**

3D skenery mají široké uplatnění v mnoha odvětvích. Ve strojírenství se často používají ve výrobě a návrhu konstrukce. V technické praxi nacházejí uplatnění při měření deformací nebo při montáži přesných zařízení. V automobilovém průmyslu se 3D skenery používají často také jako nástroj designérů. Současní designéři vytvářejí své návrhy v podobě hliněných modelů, které je pro potřeby výroby nutné převést do CAD aplikací s použitím technologie 3D skenování. Skenování nachází stále více uplatnění v architektuře, medicíně, archeologii, umění a spousty dalších odvětví. Získaná data mohou sloužit jak zdroj dat pro vytváření replik či archivaci. V zábavním průmyslu se tato data používají při tvorbě filmů a prezentací. Rozvoj internetu a internetového obchodu využívá 3D data výrobků pro prezentaci před zájemci a zákazníky. Data získaná pomocí speciálních 3D skenerů dnes zpracovávají geologové pro výzkum zemské kůry, těžební průmysl i geografové.

Získaná data mohou také sloužit jako informace v procesu zpětné kontroly jakosti výrobku jako je měření odchylek, verifikace vlastností výrobků včetně materiálové i technologické kontroly. Každá výrobní metoda i technologický postup s sebou nese rozměrové odchylky od přesných rozměrů 3D objektu. Data od původního návrhu po vyrobení součásti projdou tolika transformacemi, že je mnohdy potřeba ověřit, jak konečný výrobek odpovídá původnímu návrhu. Zejména u komplexních plechových dílů jako je karoserie se může stát, že výsledek neodpovídá přesnému původnímu návrhu. Proces ověřování technologie se nazývá CAI (Computer Aided Inspection). 3D skener nasnímá prostorová data konečného výrobku a speciální program dokáže porovnat naměřené hodnoty s původním CAD modelem. Pomocí barevného spektra lze zvýraznit odchylky nebo přímo vyčíslit jejich hodnotu.

Výstupem z prostorové digitalizace je soubor 3D bodů, nazývaný cloud of points, česky též nazývaný mrak bodů. Soubor 3D bodů může být generován řadou 3D digitizérů a skenerů, které lze členit z několika hledisek. Metody skenování lze rozdělit podle kontaktu s objektem na bezkontaktní, kontaktní a destruktivní. V prvním případě jde o 3D digitizéry a stacionární souřadnicové měřicí systémy CMM (Control Measuring Machine). Zde jsou nabízeny zařízení pro digitalizaci od 3D desktop (stolní) až po systémy pro měření objektů až několik metrů velkých. Bezkontaktní systémy měření označované jako skenery pracují nejčastěji na laserovém nebo optickém principu. Tyto přístroje mají značnou produktivitu a vytváří relativně hustou síť bodů. Uvedené typy přístrojů jsou vhodné pro snímání vnější geometrie. Existují i systémy pro snímání vnitřní geometrie.

Další členění zařízení je podle toho, zda jde o stacionární (skenované těleso se musí dopravit k zařízení) nebo mobilní systém (zařízení lze přenášet).

Zařízení se dají rozdělit také podle stupně dosahované přesnosti, a to na zařízení použitelná pro Rapid Prototyping nebo Rapid Inspection, kde je požadována vysoká přesnost skenování a na ostatní zařízení, která se uplatní např. v reklamě, filmu nebo videohrách. Některé konkrétní metody a principy skenerů jsou popsány v následujících kapitolách.

### **4.1. Kontaktní 3D Skenery.**

Kontaktní 3D skenery (někdy též nazývané mechanické skenery) se při samotném procesu skenování fyzicky dotýkají objektu. Kontaktní skenování je v podstatě měření dotykem vzdálenosti od nějakého referenčního bodu. Kontaktním hrotem je buď pohybováno souřadnicovým strojem a hovoříme tak o strojním skenování, nebo je kontaktní hrot umístěn na konci mechanického ramene a hovoříme tak o ručním skenování. Rameno má v každém kloubu senzor zaznamenávající natočení ramene v tomto místě. Poloha skenovaného bodu se získá vyhodnocením údajů ze všech kloubů ramene.

Před vlastním skenováním je vhodné na objektu vyznačit body, které se musí nasnímat, abychom získali přesný digitální obraz fyzického objektu. Počet těchto bodů je závislý na složitosti tělesa a na požadované přesnosti. Výstupem z tohoto zařízení je obrovské množství bodů definovaných 3 souřadnicemi (x, y, z).

Kontaktní skenery jsou vhodné pro digitalizaci poměrně složitých těles jak s dutinami tak i s nerovnoměrným povrchem. Další výhodou těchto skenerů je jejich relativně nízká cena. Nevýhody těchto skenerů jsou časová náročnost, malá přesnost (řádově desetiny mm) a nemožnost získat informace o textuře povrchu objektu. U ručních skenerů jsou další nevýhody vysoká pracnost a relativně malý počet získaných bodů.

Ruční kontaktní skenery jsou rozšířené z důvodu nízké ceny. Uplatňují se při návrhu designu k přenesení ručně vymodelovaných tvarů (např. z plastelíny) do prezentační digitální podoby (automobilový průmysl, letecký průmysl, zábavní průmysl atd.). Animátoři si usnadní práci s překreslováním pohybu jednoduchých postavíček tím, že všechny polohy jednoduše naskenují a dále už jen pouze rozpohybují v animačním programu, přičemž se stále pohybují v oblasti 3-rozměrné grafiky. Dnešním trendem v průmyslu počítačových zábavních programů jsou 3D hry. I v této oblasti se najde uplatnění pro mechanický 3D skener, který usnadní programátorům zrealizovat představu v praxi.

Kontaktní skenování lze také provádět pomocí zařízení, které je konstrukčně založeno na principu frézky s inverzním tokem dat. Místo řezného nástroje je v zařízení upnuta snímací sonda. Tato sonda je v přímém kontaktu se snímanou plochou, její pohyb je snímán a elektronicky vyhodnocen. Získané informace o poloze sondy jsou interpretovány jako data CAD systému. Lze použít klasickou NC frézku, která má snímací sondu pouze jako přídatné zařízení, ale pro větší objemy dat je vhodnější samostatné zařízení určené speciálně pouze pro digitalizaci.





Obr.6 Ruční skener



Obr.7 Ruční skener



Obr.8 Strojní skener

## **4.2. Optické 3D skenery.**

Optické 3D skenery využívají ke své činnosti optický obraz skenovaného objektu který se pomocí matematických výpočtů ze známých informací převede na 3D data. Tyto skenery je možno rozdělit do těchto skupin:

### **Fotogrammetrická metoda.**

Fotogrammetrická metoda je založena na principu počítačového složení několika fotografií se známým úhlem záběru. Provoz tohoto systému je levnější, rychlejší a přesnější než měřicí mechanická zařízení. Systém se skládá z digitální kamery, počítače, samolepících značek a kalibrační tyče. Výhodou oproti mechanickým zařízením je bezkontaktní snímání dat (můžeme měřit tělesa zahřátá na vysokou teplotu aniž by došlo ke zkreslení výsledků vlivem dilatace měřidla). Data získaná při měření se dají použít k vytvoření digitálního modelu s přesnou geometrií a k následnému porovnání s teoretickým CAD modelem. Před vlastním skenováním se měřený objekt na vhodných místech opatří speciálními kruhovými značkami, kterých může být i několik tisíc. Potom se udělá libovolný počet snímků z různých stran tak, aby se na snímcích vyskytly všechny body minimálně 3 krát. Součástí snímků bodů musí být i kalibrační tyč položená vedle měřeného předmětu. Takto pořízené fotografie se přenesou z fotoaparátu do počítače a zpracují se speciálním programem, který dokáže z více snímků vyhodnotit prostorové souřadnice bodů a podle kalibrační tyče přiřadit správné číselné údaje vzdáleností. Výsledkem je mrak 3D bodů, mezi nimiž se dají přesně měřit vzdálenosti. Metoda umožňuje měřit i deformace předmětu. Deformovaného stavu můžeme dosáhnout při provozu působením vnějších sil nebo tepelným zatěžováním. Přesnost této metody se pohybuje v rozmezí 0,02 až 0,1mm podle rozměru součástí. Variantou tohoto systému je rotace objektu zatímco fotoaparát je stacionární. Objekt je focen proti kontrastnímu pozadí a ze získaných fotografií je vypočten 3D model.



Obr.9 Snímací kamera s počítačem



Obr.10 Snímací kamera s pozadím

### **Triangulační metoda.**

Triangulační metoda s pomocí digitálního image processingu je metoda založena na snímání objektu osvětleného kontrastním vzorem v podobě proužků (obr. 11). Před vlastním skenováním se na objekt pravidelně umístí pomocné značky, pomocí kterých systém vypočte pozici měřicích senzorů a změřené hodnoty transformuje do souřadného systému objektu. Na povrch objektu jsou promítnuty proužky světla a pomocí dvou kamer (obr.12) jsou snímány z různých úhlů. Pro lepší zpracování získaných dat jsou na povrch objektu promítány postupně proužky různé tloušťky. Digitálním zpracováním obrazu se s vysokou přesností vypočtou 3D souřadnice každého pixelu na snímku pro každou kameru zvlášť. Protože triangulace je založena na CCD geometrii a projektor je při měření současně kalibrován, nedochází při změnách okolního osvětlení ke zkreslení souřadnic. Přesnost měření, která se pohybuje v rozmezí  $\pm 0,05\text{mm}$ , se dá srovnat s přesností mechanických měřicích přístrojů. Není nutné objekt skenovat po pravidelných úsecích, ale stačí udělat snímky nepravidelně a díky pomocným značkám systém vyhodnotí přesnou pozici snímku. Tuto metodu 3D digitalizace lze aplikovat pro libovolné objekty jako jsou obrobky, modely, formy, části lidského těla, apod. bez přímého kontaktu s nimi.



Obr.11 Kontrastní proužky při snímání



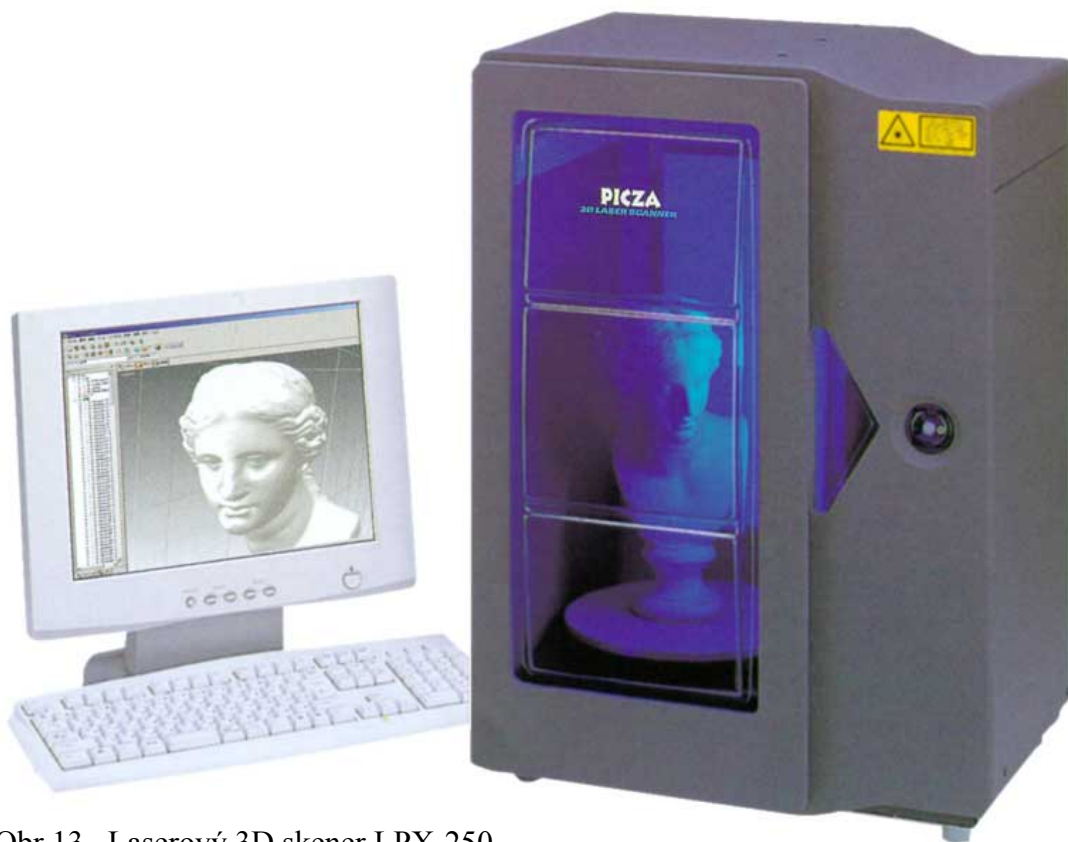
Obr.12 Snímací kamery s generátorem proužků

### **Mřížková metoda.**

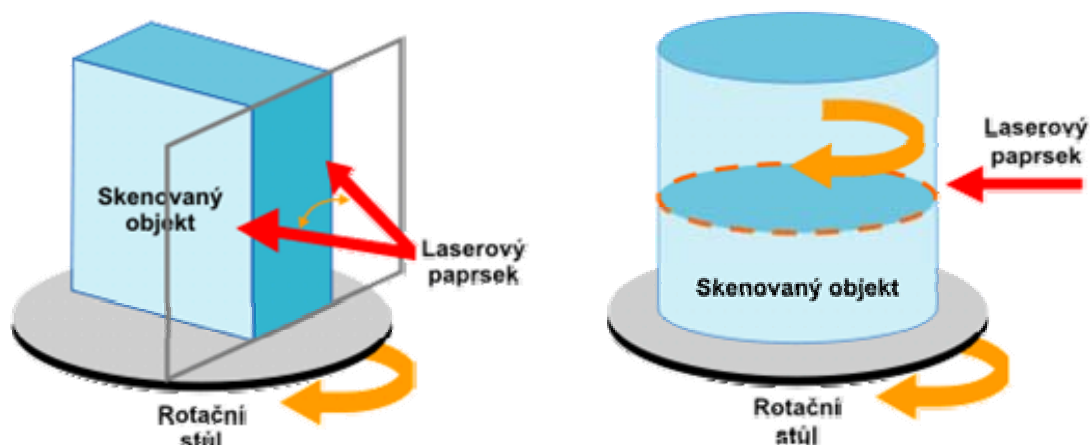
Mřížková metoda je určena pro 3D snímání lisovaných plechů. Před tvářením se na povrch plechu vyleptá pravidelná mřížka bodů. Po skončení tváření se deformovaná mřížka nasnímá CCD kamerou a zpracuje na počítači. Z výsledné deformované mřížky systém dokáže určit přesnou geometrii výrobku, změnu tloušťky plechu a vektor tváření. Takto se může sledovat proces tváření a je možné najít kritická místa.

### 4.3. Laserové 3D skenery.

Laserové 3D skenery pracují na základě vyměřování laserového paprsku a na principu triangulace (Laser Stripe Triangulation). Povrch objektu je snímán paprskem směrem od vrcholu ke spodu objektu. Paprsky odražené od tělesa jsou soustředěné do ohniska snímacího zařízení, ve většině případů se jedná o CCD čip. Výsledkem je vzájemná poloha skenovaných bodů na povrchu. Velké výsledné množství dat je nutné dále zpracovat. Výhodou této metody je velká rychlost snímání objektu. Stolní laserové skenery umožňují duální režim skenování což umožňuje kombinaci plošného a rotačního skenování.



Obr.13 Laserový 3D skener LPX-250



Obr.14 Plošné a rotační skenování.

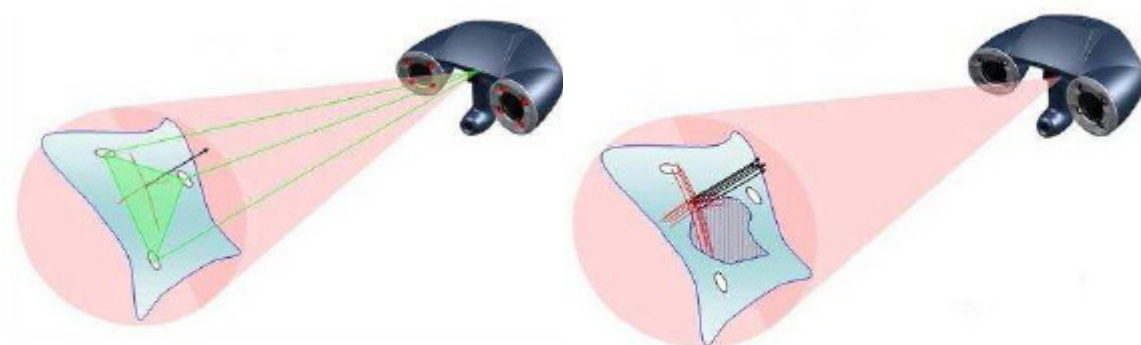
Ruční laserový 3D skener umožňuje vzájemný pohyb skeneru a tělesa během snímání. Skener identifikuje poziční značky na tělese nebo podložce a pomocí dvou kamer snímá laserový kříž na tělese. Na počítači se v reálném čase zobrazuje obraz snímání, těleso i laserový kříž a automaticky se generuje polygonová síť.

Díky této technologii snímání a vyhodnocování dat lze velice jednoduše snímat i tvarově složité modely. Poziční značky umožňují automaticky určovat vzájemnou polohu skeneru a snímaného tělesa. Výsledná síť se automaticky přepočítává na základě všech nasnímaných dat podle zvoleného rozlišení. Systém zaznamenává všechny snímky a díky tomu je možné data neustále zpřesňovat a upravovat. Okamžité zobrazení výsledků snímání urychluje vyhledání míst, která nebyla nasnímána nebo vyžadují detailnější snímání. Ruční 3D skenery mají přesnost řádově 0,05 mm.

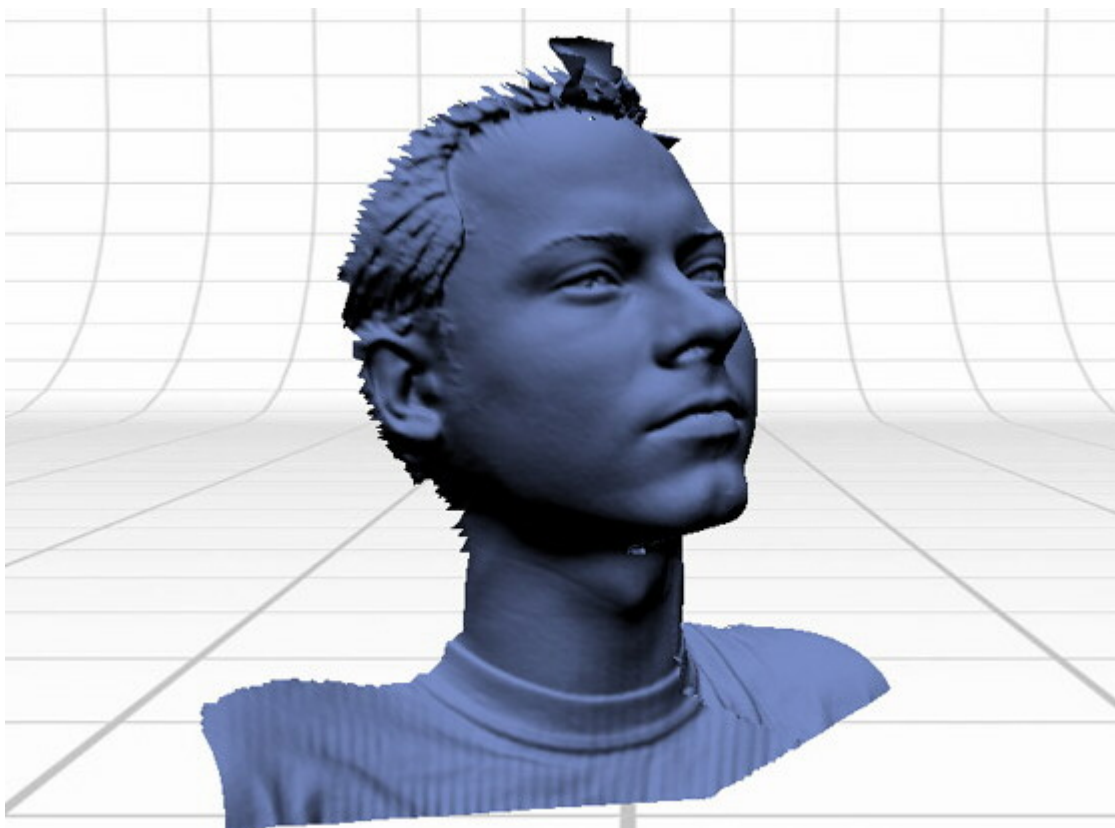


Obr.15 Ruční Laserový 3D skener HandyScan 3D.

Snímání je založeno na principu triangulace. Reflexní značky mohou být umístěny na podložce, nebo přímo na snímaném tělese. Pokud obě kamery současně vidí minimálně 3 reflexní značky, je systém schopen automaticky určit polohu snímaného tělesa. Pro umožnění pohybu je nutné vidět 4 reflexní značky, vzájemná poloha reflexních bodů je jedinečná a systém tedy kdykoli dokáže navázat na již nasnímané body dalším snímáním. Obě kamery snímají laserový kříž z povrchu tělesa a systém tak získá informace o ploše. Rozlišení je definované na základě velikosti pracovního prostoru.



Obr.16 Princip snímání ručním Laserovým 3D skenerem.



Obr.17 Ukázka snímaných dat Laserovým 3D skenerem.



#### **4.4. Destruktivní 3D skenery.**

Destruktivní 3D skenery pracují na principu focení objektu po vrstvách. Slabé vrstvy se z daného objektu odřezávají nebo odfrézují a tím je možno vyfotit další vrstvu. Aby byl obraz kontrastní je objekt zalit do tuhého kontrastního materiálu.

Součástí systému je upínací mechanismus, pomocí kterého se připevňuje blok obsahující součást na základnu řezacího nebo frézovacího stolu. Proces digitalizace není náročný na obsluhu, stačí zadat tři základní informace o rozměru bloku, materiálu součásti a počáteční výšce. Ostatní parametry vypočte systémem automaticky. Jedná se o otáčky vřetene, hloubku řezu, posuv, nastavení stupnice šedi atd. Doba analyzování součásti trvá několik hodin v závislosti na rozměru objektu, na počtu hladin a skenovacím rozlišení. Nasnímaná data se zpracovávají a software tyto údaje automaticky uspořádá do 3D obrazu. Nepotřebné body jsou odstraněny a výstupem je uživatelem definovaný soubor hodnot v ose X, Y, stejně jako v ose skenovaných hladin.

Výhodou této metody je možnost digitalizace i vnitřní struktury objektu včetně dutin které nemohou jiné metody zachytit. Nevýhodou této metody je fyzické zničení objektu. Ve srovnání s rentgenovými systémy je tento způsob skenování až o 80% levnější, snadněji ovladatelný a přesnější při finálním zpracování součásti. Systém nabízí vyšší schopnost digitalizace a provedení než je tomu u laserových digitizérů, dotykových sond, rentgenů a vlastních CAD reprodukcí u součástí s vnitřními prvky.

Tyto skenery se používají ve strojírenství. Obdobou těchto skenerů jsou skenery určené pro snímání vnitřní struktury biologického materiálu ve zdravotnictví a biologii.



Obr.18 Destruktivní 3D skener RE1000 od firmy CGI



#### **4.5. Další principy 3D skenerů.**

Kromě nejčastěji používaných skenovacích metod jsou zde i metody které využívají i jiné metody 3D skenování. V podstatě se jedná o interakci energie s objektem a následné vyhodnocení odezvy.

- **Ultrazvukové 3D skenery** využívají principu šíření zvuku v prostředí. Každý materiál či obecně řekneme každé hmotné prostředí ovlivňuje šíření mechanického vlnění, které můžeme nazvat zvuk. Každé různé prostředí ovlivňuje rychlost vedení zvuku a každé prostředí částečně odráží i tento zvuk. (Každý hmotný bod částečně absorbuje vlnění a stává se zdrojem vlnění.) Analýzou odezvy prostředí se vytváří prostorový obraz daného prostředí, tedy 3D obraz objektu. Tato metoda nachází uplatnění ve strojírenství a medicíně. Obdobného principu využívají i geologové a těžební průmysl pro skenování geologického podloží a pro zjištění výskytu nerostných surovin.
- **Rentgenové 3D skenery** využívají principu prostupu rentgenového záření hmotou, tedy jejího absorbování ve hmotném prostředí v závislosti na materiálu a struktuře. Tímto způsobem je možné skenovat i vnitřní strukturu kovových objektů např. odlitky. Tato metoda se uplatňuje jak ve strojírenství tak i v medicíně. (PTC – Persona compute tomography)
- **Rastrovací mikroskop** je 3D skener používaný pro detailní skenování povrchu a jeho struktury. Miniaturní hrot jehož špičku tvoří jediný atom se pohybuje nad sledovaným povrchem a na základě energetické interakce je tento povrch skenován. K posuvu slouží mikrokrokové mechanismy s přesným nastavením polohy pomocí piezoelementů. Touto metodou je možné sledovat strukturu materiálu i strukturu polovodičů. Rozlišovací schopnost této metody je několik atomů.
- **Družicové 3D skenery** jsou určeny ke skenování povrchu planet. Jedná se o atypické skenery a jsou zde uvedeny pouze jako jakási pověstná třesnička na dortu. Tyto skenery využívají vědní obory jako je geologie, kartografie a astronomie. V dnešní době je povrch planety Země neskenován s rozlišením pouhých 20 metrů.

## **5. Modelování 3D vrstvením materiálu.**

Při výrobě prototypu je možno postupovat klasickými metodami jako je zhotovení modelu obráběním na CNC strojích. Takový model je možné vyrobít přímo z kovu. Nevýhodou je že některé složité tvary nelze tímto způsobem vyrobít. Přestože tato metoda využívá propojení s CAD/CAM systémy je její použití technologicky náročné a zdlouhavé.

Technologie Rapid Prototyping na rozdíl od obrábění, kdy se materiál odebírá, pracuje na principu přidávání materiálu po vrstvách. Prostorový model je při tomto procesu vytvářen přímo podle dat, která přicházejí z počítače. 3D model načtený z CAD/CAM systému je příslušným post-procesorem rozdělen na geometrická data jednotlivých vrstev. Tato data prototypovací stroj zpracuje a fyzický model postupně vrstvu po vrstvě opět sestaví. Tímto způsobem se můžou vyrobít i tvarově velmi složité součástky s dutými vnitřními prostory, šikmými i vodorovnými spodními stěnami nebo žebry.

V průběhu let se vyvinulo a prosadilo několik technologií, které pracují na principu modelování pomocí postupného přidávání nebo vytvrzování vrstev materiálu. Mezi tyto technologie, které jsou souhrnně označovány termínem Rapid Prototyping patří:

- Stereolitografie (SLA)
- Solid Ground Curing (SGC)
- Selective Laser Sintering (SLS)
- Laminated Object Manufacturing (LOM)
- Selective Adhesive and Hot Press (SAHP)
- Fused Deposition Modelling (FDM)
- Model Maker 3D Plotting (3DP)
- Ballistic Particle Manufacturing (BPM)
- Multi Jet Modeling (MJM)

Některými těmito metodami se budou zabývat následující kapitoly.

### **5.1. Stereolitografie ( SLA ).**

SLA je první komerční zavedená technologie Rapid Prototyping. Instalace prvních zařízení spadají do roku 1987. Metoda SLA položila základ pro ostatní technologie RP, které převzaly základní princip vytváření modelu z vrstev materiálu.

Model zhotovený technologií SLA je možné použít například jako designérskou studii nebo ověření funkčnosti celé sestavy přes silikonové a vstřikolisové formy až po výrobu sádrové formy pro odlitky z hliníkových a hořčíkových slitin. Důležité je i použití SLA v medicíně, kdy se data z tomografu nebo magnetické rezonance převedou pomocí speciálního softwaru na objemový model, který je následně použit při výrobě stereolitografického modelu. Lze tak například zkrátit dobu přípravy komplikované operace nebo usnadnit výrobu náhrady (implantátu) za poškozený kloub.

Použitý materiál pro zhotovení součástky, kterým je fotopolymorfni pryskyřice, která po vytvrzení umožňuje širokou škálu mechanických povrchových úprav (od jemného broušení přes pískování až k dokonalému vyleštění).

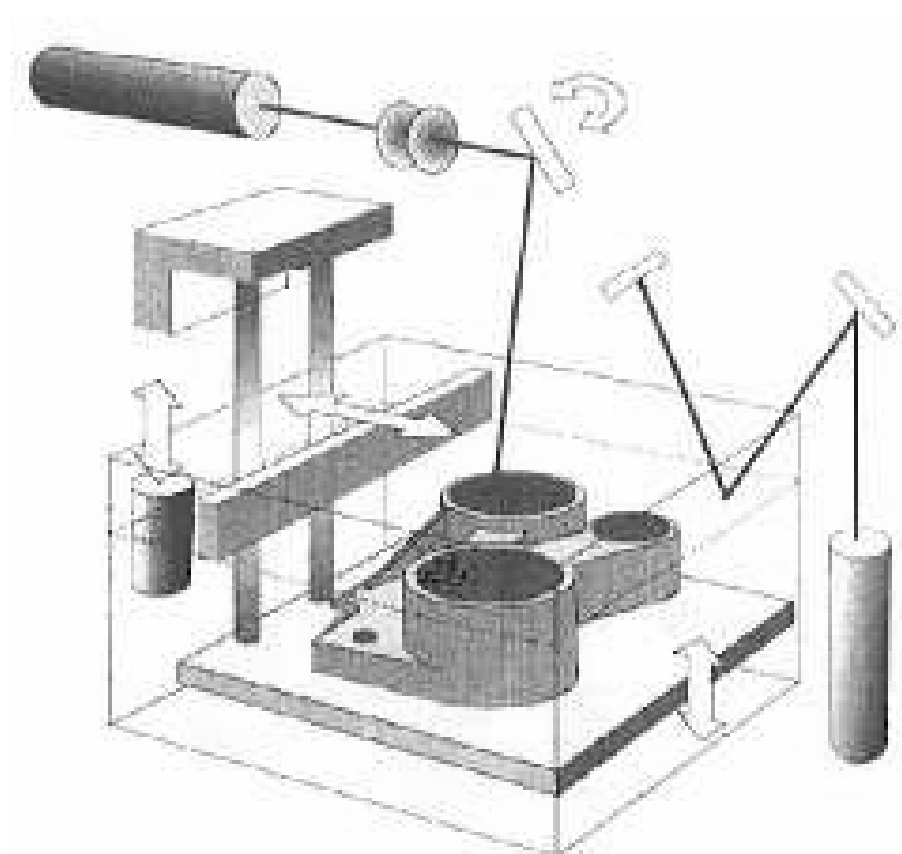
Takto připravená prototypová součást může být použita pro výrobu silikonové formy při požadavku na zhotovení několika desítek kusů plastového dílu z polyuretanu, popřípadě na výrobu vstřikovací formy pro zhotovení několika stovek až tisíců kusů ze sériově vyráběných plastových materiálů (ABS, PA, POM).

Stereolitografie je v současné době na vrcholu technologických metod systému Rapid Prototyping zejména proto, že umožňuje dosáhnout vysoké přesnosti při výrobě prototypové součásti (master modelu). Zhotovená součást se běžně používá pro sestavování tzv. „data-control-modelů“, což například v automobilovém průmyslu představuje nefunkční prototyp, na základě kterého jsou připravovány sériové nástroje a vstřikovací formy. Stereolitografický stroj je složen ze tří hlavních částí: z pracovní komory, řídicí jednotky a opticko-laserového systému. V pracovní komoře je umístěna nádoba s epoxidovou pryskyřicí, ve které se ve směru osy Z pohybuje platforma a nůž zajišťující rovinu pryskyřice v každé vrstvě. Řídicí jednotka obsahuje počítač, který ovládá celý stroj - od nastavení parametrů laseru až po řízení procesu výroby. Poslední část, opticko-laserový systém, se skládá z plynového či pevnolátkového laseru, čoček a soustavy zrcadel pro nasměrování laserového paprsku.

Princip zhotovení prototypových součástek technologickou metodou stereolitografie je tzv. „drawing out“ vytvrzování (ozařování každého příčného řezu vytvářené prototypové součástky laserovým paprskem v souřadném systému X-Y). Základní deska je umístěna v pozici pod hladinou v nádobě naplněné vazkým fotopolymerem. Fotopolymer se vyznačuje specifickou fyzikální vlastností, tj. po osvětlení libovolným světelným zdrojem dochází k jeho ztuhnutí. Pro přesné určení místa osvětlení v SLA zařízení je použit paprsek LASERu.

Celé zařízení SLA je tvořeno hermeticky uzavřenou komorou (zabránění úniku výparů vzniklých působením LASERu na fotopolymer). Laserový paprsek působí na plochu fotopolymeru po vrstvách vygenerovaných obslužným programem. Paprsek se pohybuje v osách X-Y, přičemž je do požadovaného směru vychylován zrcadlem. V

okamžiku dokončení jedné vrstvy se základní deska sníží ve směru osy Z směrem pod hladinu. Dojde ke smočení vytvořené vrstvy. Deska se vysune přibližně o hodnotu tloušťky nové vrstvy. Konečná tloušťka se vytvoří pomocí stírací lišty. Tento postup se opakuje tak dlouho, dokud není součást kompletní. Tloušťky jednotlivých vrstev jsou v rozsahu 0,05 až 0,15 mm.



Obr.19 Princip stereolitografie

Součásti s převýslými plochami mohou být vytvářeny bez podpurných struktur. Obslužný program podpory vygeneruje pokud plochy svírají malý úhel se základní deskou a jsou navíc štíhlé. Pokud by podpory vygenerovány nebyly, hrozí že se počáteční tenké vrstvy mohou zvlnit nebo odlomit například při pohybu součásti ve vertikálním směru (směr vytváření jednotlivých vrstev). Podpora je nejčastěji tvořena jako tenkostěnný objekt, který je možné mechanicky odstranit (odlomením) po dokončení prototypové součástky.

První stereolitografická komerční využitelná zařízení představila americká firma 3D Systems koncem osmdesátých let minulého století. Stereolitografické zařízení této firmy vytvářejí vrstvy tloušťky řádově v setinách milimetru. Technologii SLA komerčně rozvinuly i další firmy:

EOS  
Fockele&Schwarze  
Cubital  
CMET-NTT-Data Communication

D-MEC-JR/Sony  
Teijin Seiki  
Denken-Engineering  
Meiko Corp.  
Mitsumi Zosen  
Usnil Inc.

**Závěrečné úpravy součástí po jejím vyjmutí spočívají ve:**

- vytvrzení v UV peci (délka vytvrzení je závislá na velikosti součásti a pohybuje se řádově v hodinách až desítkách hodin)
- povrchová úprava stříkáním, případně se povrch součástky vyleští nebo otryská měkkým materiálem za účelem dosažení matného povrchu.
- uložení součásti do stativu – šablony (používá se hmotných nebo štíhlých součástí) – pro vytvoření stativu se používají specializované programy (například Magic)

Celý proces výroby prototypových součástek stereolitografickou metodou trvá hodiny a v případě velmi složitých kombinovaných dílů několik dní.

**Výhody:**

- masivní materiál
- velký stavební objem
- modely mohou obsahovat otvory velikosti řádově mm
- tloušťka vrstvy 0,05 až 0,15 mm
- přesnost (0,05 ÷ 0,2 mm/100 mm)
- Povrch součásti s velmi nevýraznou schodovitou strukturou
- RP proces vhodný pro nepřímou výrobu nástrojů

**Nevýhody:**

- pomalý proces tvrzení polymeru
- Práce s fotopolymerní pryskyřicí a LASERy vyžaduje hermeticky uzavřenou komoru – zařízení SLA je finančně nákladné
- malá tepelná a mechanická odolnost vzniklého modelu
- nutná speciální forma (šablona) pro skladování součásti (deformuje se vlastní hmotností)
- Malý výběr použitelných materiálů pro prototypové součásti

### **Základní typy materiálů SLA:**

- **Akryláty**
  - Starší materiál který se dnes již moc nepoužívá
  - Velká smršťivost
  - Menší přesnost
- **Epoxidy**
  - Moderní materiál
  - Malá smršťivost
  - Lepší přesnost
- **Plněné pryskyřice**
  - Pro namáhání nebo spékání v praktickém využití
  - Vyplňované organickými materiály, keramikou nebo kovy

### **Hlavní vlastnosti materiálů pro SLA:**

- Viskozita
- Rychlost výroby
- Pevnost polotovaru
- Odolnost vůči vlhkosti
- Přesnost
- Povrchové vlastnosti
- Dvousložkovost
- Průzračnost nebo neprůsvitnost
- Změna barvy
- Napětí v tahu
- Modul pružnosti
- Napětí v ohybu
- Rázové napětí
- Poměrné prodloužení
- Teplota při sklovitosti
- Odolnost vůči teplotě
- Koeficient tepelné roztažnosti
- Obrobitelnost

### **Mechanické vlastnosti materiálů – modul v tahu (při pokojové teplotě):**

<b>Materiál</b>	<b>modul v tahu [MPa]</b>	<b>max. napětí v tahu [MPa]</b>	<b>poměrné prodloužení [%]</b>
Accura SI 40	2840 - 3048	62	4.9 – 6.4
SL7560	2400 - 2560	40 – 62	6 – 15
Prototool	10100 - 11200	70 – 79	1.2 – 1.3
ABS (Terluran HH-106)	2400	51	9

Tabulka 1

*Poznámky:*

*Modul v tahu - vztah mezi namáháním a napětím*

*Max. napětí v tahu - Maximální napětí při kterém dojde k prasknutí součásti*

*Poměrné prodloužení - Maximální prodloužení do prasknutí*



Obr.20 Master model vytvořený SLA technologií.



Obr.21 Master model vytvořený SLA technologií.

## **5.2. Solid Ground Curing (SGC).**

Technologická metoda SGC byla vyvinuta a komerčně zavedena izraelskou firmou Cubital Ltd. Využívá specifický postup vytvrzování jednotlivých vrstev fotopolymerní pryskyřice za působení intenzivního impulsu UV záření po celé vrstvě v jednom okamžiku.

Metoda SGC na úplný příčný řez v jedné operaci a na okamžité vytvrzení celého řezu využívá dopadu intenzivního UV záření přes negativní fotomasku. Postup vytváření fotomasky je založený na principu elektrofotografie (xerografie). Technologie SGC kombinuje ve své podstatě tři zařízení, t.j. kopírku, SL zařízení a NC frézku.

### **Metoda SGC se skládá ze tří základních procesů:**

- tvorba (generování) negativní fotomasky
- výroba jednotlivých řezů - vrstev
- mechanická úprava vytvrzené vrstvy

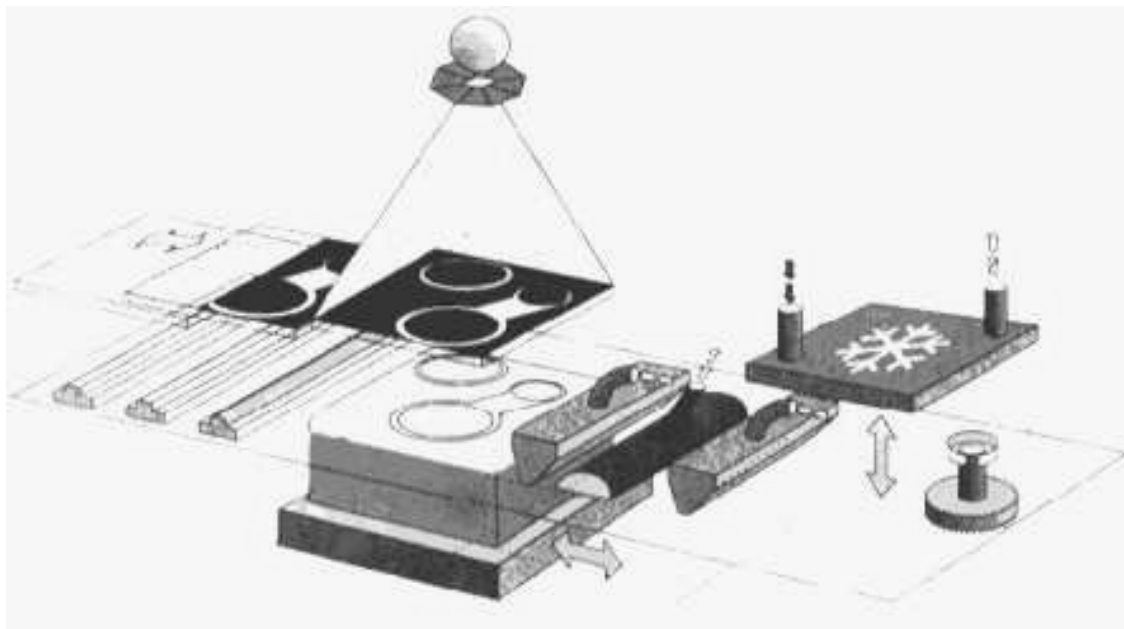
Na vyráběnou součást je aplikována fotopolymerní pryskyřice při průchodu pod aplikátorem tekutého fotopolymeru. Současně s tímto procesem je generována negativní fotomaska příčného řezu elektrostatickým přenosem barev na skleněnou desku (elektronová dýza vykresluje šablonu řezu na skleněnou desku, která je poté vyplněna tonerem). Skleněná deska se následně přesune do ozařovací komory, kde je přesně umístěna nad předchozí řez. Uzávěr ozařovací komory se na potřebnou dobu otevře, UV záření projde fotomaskou a způsobí vytvrzení fotopolymerního řezu v požadovaném tvaru. Protože UV záření je velmi intenzivní, řez poměrně rychle vytvrdne a není potřebné jeho pozdější vytvrzování jako u stereolitografie. Skleněná deska s fotomaskou se zbaví barvy a je kompletně vyčištěna.

Nová maska se elektrofotograficky znovu vygeneruje na skleněné desce a celý proces se opakuje. Vytvářená součást se pohybuje k aerodynamickému stíracímu zařízení, kde je neztvrdnutá pryskyřice odsáta vzduchem a znehodnocena. Poté se vytvářená součástka přesune pod aplikátor vosku, kde se prázdná místa vzniklá odstraněním neztvrdnuté pryskyřice vyplňují voskem. Vosk ztuhne při průchodu součástky pod chladicí nádrží. Posledním krokem procesu SGC je přechod vytvářené prototypové součástky pod frézovací hlavou. Vosk a vytvrzený fotopolymer jsou vyfrézovány na potřebnou tloušťku a celý cyklus se opakuje, dokud není součást kompletní.

Hotová součást je podrobena dokončovacím operacím. Prvním krokem je odstranění vosku. Vosk je možné odstranit roztavením nebo použitím koupele rozpouštějící vosk, např. použitím kyseliny citrónové (podle typu použitého vosku). Protože čas výroby každé vrstvy je nezávislý na geometrii a velikosti součástky, může být vyráběno více součástí zároveň (např. 4 součástky ustavené vedle sebe). Pomocný



voskový materiál umožňuje vícenásobné součástky uložit do jednoduché skupiny (např. dvou řad nad sebou). Jako vstupní materiál pro výrobu prototypových součástí technologickou metodou SGC se používá fotopolymerní akrylátová pryskyřice (např. Cubital Solimer Resin XA-7501).



Obr.22 Princip metody Solid Ground Curing

První komerční zaváděná zařízení měla hmotnost několik tun a pro jejich provoz byla nutná hermeticky uzavřená místnost. Postupným vývojem bylo dosaženo podstatného zmenšení což umožnilo, že celý technologický systém byl umístěn v hermeticky uzavřené skříni.

Pro názornost lze uvést, že výroba dětské přilby o rozměrech 260x180x140 mm trvá tímto způsobem asi 32 hod (24 hod. trvá vytváření modelu, 5 hod. čištění, 3 hod. ruční dokončení).

### Výhody:

- Konečné vytvrzení fotopolymery proběhne již v komoře technologického zařízení
- Malé vnitřní napětí a deformace ve vytvářené součásti
- Tvarová složitost vyráběných součástí nemá vliv na dobu výroby
- Poškozené vrstvy mohou být hned po jejich zjištění odfrézovány
- Možnost výroby několika součástí současně – v závislosti na velikosti komory
- Výroba součástí nevyžaduje vygenerování podpor
- Povrch součástí s velmi nevýraznou schodovitou strukturou

**Nevýhody:**

- Během ozařování UV světlem dochází u fotopolymerů k nárůstu jejich viskozity, což má za následek její obtížné použití při vytváření vystupujících částí
- Fotopolymerní pryskyřice vyžaduje hermeticky uzavřenou komoru
- Malý výběr použitelných materiálů pro prototypové součásti
- Dokončovací operace - nezbytné odstranění vosku, potřeba vymývacího zařízení

### **5.3. Selective Laser Sintering ( SLS ).**

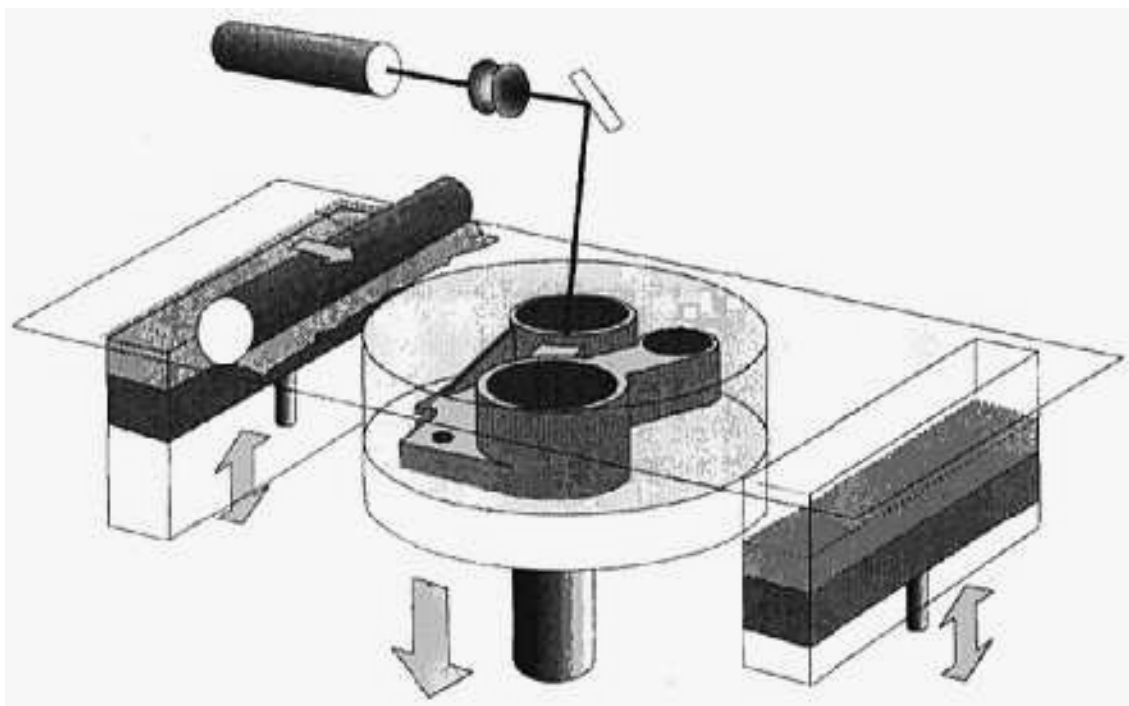
V současnosti existuje několik technologií RP, které používají k výrobě prototypové součásti LASER tak, že dochází k roztavení a spojení práškového materiálu.

Technologická metoda Selective Laser Sintering byla vyvinuta v roce 1986 Carlem Deckardem na Texaské Univerzitě v Austinu a později komercializována společností DTM Corporation (USA). Německá společnost EOS GmbH – Electro Optical Systems také vyvinula a uvedla na trh svoje vlastní zařízení pro využití této metody.

Společným principem technologie SLS je že teplo vytvářené působením laserového paprsku roztaví a vytvrdí termoplastický prášek. Nejčastěji používaný LASER JE CO<sub>2</sub> výkonu 50 až 100W, který vytváří koncentrovaný infračervený paprsek (vlnová délka 10 000nm). V hermeticky uzavřené komoře se udržuje teplota těsně pod bodem tavení termoplastického prášku. Takto je potřeba jen nepatrně zvýšit teplotu dopadajícího paprsku, čímž se dosáhne spojení řezů, což značně urychlí proces výroby. V hermeticky uzavřené komoře se udržuje atmosféra tvořená dusíkem, která zabraňuje možnému výbuchu prachu.

Nová vrstva vytvářené součásti vzniká ve válcové pracovní komoře tak, že na stlačenou vrstvu prášku (termoplastický materiál) tepelně působí laserový paprsek. Paprsek je vychylován optickým systémem v souřadných osách X - Y po ploše řezu na základě povelů ze skenovacího systému. Po spojení vrstvy vytvářené prototypové součásti se pracovní stůl sníží o tloušťku vrstvy (0,1 až 0,5mm). Dávkování prášku je uskutečněno zdvihem pístu dávkovacího zařízení. Potřebné množství prášku se pohybem válce stlačuje na úroveň horní hrany pracovní komory. Cyklickým opakováním tohoto postupu se dokončí vytváření součásti a následně je hotová součástka vyzdvihnuta pracovním stolem. Přebytný prášek je odstraněn odsátím nebo mechanicky například kartáčem. Následují dokončovací operace které spočívají v odstranění zbytků prášku, broušení povrchu, případně je povrch stříkán tmelen. Metoda SLS nevyžaduje generování podpurných struktur, protože přesahující a duté části součástky jsou podepírány stlačeným práškovým podložím.

Čas konečné úpravy součásti je porovnatelný s časem potřebným při použití technologické metody SLA. Výsledný vzhled plochy součásti není vždy optimální, neboť při spojování jednotlivých řezů mohou vznikat na jejich površích a ve struktuře póry. Tato skutečnost může vést ke zvýšení časových nároků na dokončení součásti. Vyrobená součástka však může být infiltrována jiným materiálem, který zlepší její mechanické vlastnosti.



Obr.23 Princip metody Selective Laser Sintering

Výhodou metody SLS oproti ostatním metodám RP je možnost zpracovávat větší spektrum materiálů. Principiálně mohou být zpracovávány všechny teplem tavitelné, případně teplem měknoucí práškové materiály. Standardně je využívána výroba součástí z termoplastických materiálů (polyamid, polyamid plněný skelnými vlákny, polykarbonát, polystyrol), speciální nízkotavitelné kovové slitiny z niklových bronzů a polymerů potažených ocelovým práškem. Nejčastěji se používá speciální práškový polyamid (bez nebo se skelnou výplní), který se mechanickými vlastnostmi přibližuje vstříkovanému polyamidu.

Součástky vytvořené technologií SLS nacházejí uplatnění tam, kde jsou vystaveny zátěžovým a napětovým testům, tedy zkouškám během provozu stroje, například v automobilovém průmyslu tzv. crash-testy. Nevýhodou technologie SLS je dosahovaná přesnost s ohledem na tloušťku vrstvy, která se pohybuje v rozsahu 0,1 až 0,5 mm.

Dle druhu použitého modelovacího materiálu je možno v rámci této technologie rozlišovat tyto metody:

- **Laser Sintering – Plastic.** Stejně tak jako například u FDM je možno volit z několika druhů plastických materiálů, které svými vlastnostmi určují i způsob využití hotového modelu. Při použití polystyrenu je možné použít výsledný model ve standardní metodě lití do ztraceného vosku, přičemž je možno snadno modelovat i velmi komplikované části výrobku. Při použití nylonu dosahují výsledné modely vynikající mechanické vlastnosti jako tvrdost, houževnatost, teplotní odolnost atd. Tyto modely jsou proto vhodné pro funkční zkoušky nebo testy lícování.

Standardním využitím všech modelů je prostorová vizualizace navrhovaného výrobku.

- **Laser Sintering – Metal.** Modely vzniklé touto metodou dosahují dostatečné pevnosti a mechanické odolnosti. Tyto modely je možno využít jako formy pro výrobu plastových součástek vstřikováním nebo lisováním.
- **Laser Sintering - Foundry Sand.** Tato metoda používá upravený slévárenský písek, jehož vytvrzováním je možno bez jakýchkoli mezikroků vytvořit na prototypovacím zařízení klasickou pískovou formu pro lití. Je to jedna z nejnovějších technologií rapid prototyping.
- **Laser Sintering – Ceramic.** Výchozím materiálem je v tomto případě prášek slepovaný pomocí tekutého pojiva. Nanášení pojiva je zajištěno pomocí Ink-Jet tryskové hlavy, která je vedená v rovině XY podle předem vypočítaných řídicích údajů. Pomocí této metody se dají vyrábět různé součástky z keramického prášku nebo formy a jádra pro technologii přesného lití.

### Výhody:

- levný a zdravotně nezávadný materiál
- široký výběr používaných materiálů: vosk pro vyplnění dutin, polymer – nylon, polyamid, polyamid plněný skelnými vlákny, polykarbonát, polystyrol
- není potřebná podporná struktura
- snížení možnosti destrukce od vnitřních napětí
- použitý materiál může dát velkou pevnost modelu

### Nevýhody:

- drsná plocha po konečné úpravě („schodový efekt“)
- pórovitost součástky
- první vrstva vyžaduje čištění výrobního zařízení

#### **5.4. Laminated Object Manufacturing (LOM), Selective Adhesive and Hot Press (SAHP).**

V současnosti jsou dostupné dvě komerčně využívané laminovací technologické metody systému RP:

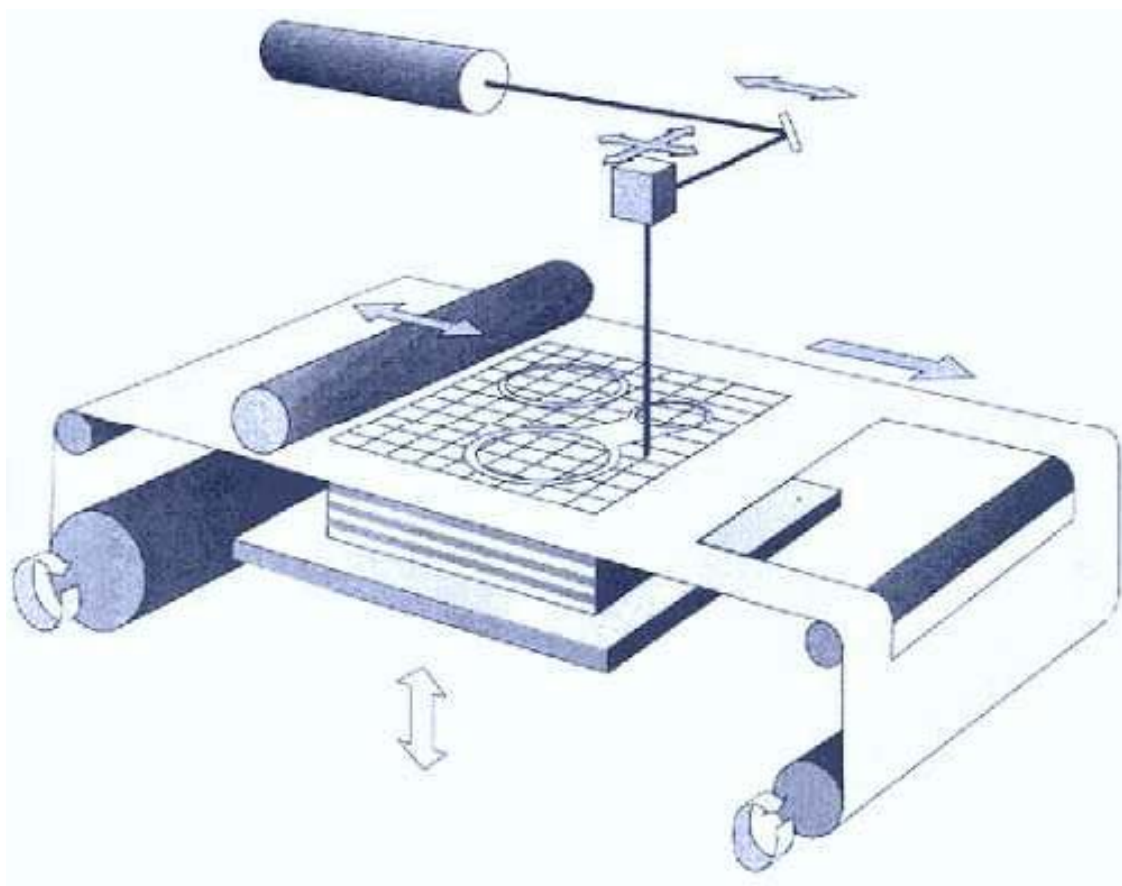
- Laminated Object Manufacturing – LOM
- Selective Adhesive and Hot Press - SAHP.

Určité obměny těchto laminovacích metod představují metody Thick Layer Lamination (firma Stratoconception – Francie), Precision Stratiform Machining (firma Ford Research – USA) a Adaptive Layer Lamination (firma Landfoam Topographics – USA). Představují hybridní technologie využívající i technologie CNC obrábění (frézování), jejichž úlohou je zvýšit rychlost procesu vytváření prototypových součástek, zvětšit množství používaných materiálů a při vyřezávání hran z hrubších vrstev se vyhnout stupňovitým krokům.

Technologická metoda LOM byla vyvinuta Michalem Feyginem v roce 1985. Tvar příčných řezů vytvářeného modelu je vyřezáván laserovým paprskem z papíru opatřeného tavným pojivem (butcher paper). Papír se odvíjí ze svitku (role) na pracovní desku a s předcházejícím řezem je spojen přitlačením nažehlovacím válcem. Válec roztaví tavný povlak na spodní straně papíru tak, aby se vytvořila pevná vazba. Tvary vytvářené součástky jsou řízeny pomocí optického systému a polohovacím zařízením v rovině X-Y. Po vystříhnutí tvaru vytvářené součástky a křížovém „šrafování“ je geometrie řezu hotova a zbylý papír se navíjí na navíjecí válec – válec s odpadem. Křížové šrafování následně umožní lehké odstranění podpůrné struktury.

Metoda LOM umožňuje vytvářet libovolně tvarovanou součást rychleji než předešlé technologie, protože jsou vytvářeny obrysy řezů – výplně řezu tvoří papírová fólie. Při činnosti zařízení LOM vzniká značné množství plynů. Na jejich odstranění se používají odsávací případy filtrační systémy, jako je např. komín či filtrace přes dřevěné uhlí a pod. Pracovní komora je hermeticky uzavřena.

Technologie LOM umožňuje vytvářet jak převíslé plochy tak i výřezy. Pro určité tvarově složité součásti, například chladicí kanály v hlavě motoru, může být odstranění zbytkového materiálu zdoluhavým procesem. Konečná úprava vyrobených součástí spočívá v odstranění podpor, broušení, tmelení a stříkání. Výrobky v surovém stavu vzhledem i dotykem připomínají dřevo a mohou být obráběny a dokončeny obdobným způsobem jako dřevěné výrobky.



Obr.24 Princip metody Laminated Manufacturing

Technologie Selective Adhesive and Hot Press – SAHP, je metoda, kterou vyvinula firma KIRA Corporation. Na vyřezávání jednotlivých vrstev se používá čepel namísto laserového paprsku a na spojování řezů se používají lepidla s využitím principu xerografických zařízení. Výrobní zařízení používají standardní kancelářský papír, který je podáván do stroje z běžné laserové tiskárny. Tiskárna využívá adhesivní (základní) toner pro tisk hlavních čar příčných řezů. Ohřívaná deska přitlačením spojí papír s předcházející vrstvou. Hlavní nárys příčného řezu je poté vyřezán čepelí, která je namontována na otočném a pohyblivém držáku (obdoba řezacího plotru).

Použití metody SAHP je orientováno na laboratoře a dílny. Předností je, že využívá komerčně dostupné zobrazovací zařízení v kancelářském prostředí. Hlavním nedostatkem je, že velikost výrobního zařízení je omezena komerčně dostupnými laserovými tiskárnami. Technologické metody LOM a SAHP vykonávají řez, který je přibližně kolmý na vrstvu papírového materiálu. Perspektivním záměrem je řezat papír se zešikmenými okraji, aby se zredukoval postupný schodovitý efekt.

**Výhody:**

- žádné chemické změny a minimální ohřev - zanedbatelný úbytek objemu a zanedbatelné vnitřní napětí
- snížení výrobního času o čas potřebný na ohřev a na ochlazení
- laserový paprsek vyřezává pouze tvar součástky
- nejsou nutné podpory
- může se používat široké spektrum vstupních materiálů
- levná údržba výrobního zařízení
- nepoužívají se toxické materiály

**Nevýhody:**

- odstraňování nadbytečných částí může být problematické, protože laserový paprsek se prořezává skrz vytvořené vrstvy
- příčné šrafování je propálené a materiál zeslabený, což může způsobit poškození jemných součástek při odstranění přebytečných částí
- neuzavřené části mohou být zachytávány podpůrným materiálem
- vlastnosti materiálu se mění se změnou směru laminace
- plochy jsou po dokončení drsné, další dokončovací obrábění je limitováno odlupováním jednotlivých vrstev

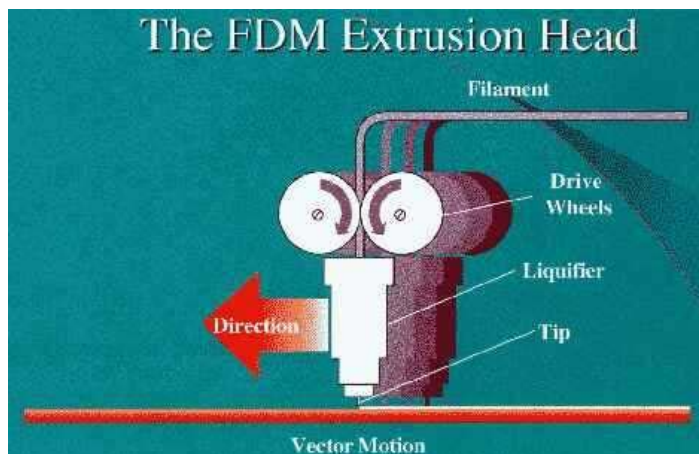


### 5.5. Fused Deposition Modelling ( FDM ).

Technologie RP označovaná pojmem Fused Deposition Modeling – FDM (postupné kladení taveniny) byla vyvinuta Scottem Crumpem a komerčně využita firmou Stratasys v roce 1991. Tato technologie nepoužívá jako nástroj pro tvorbu součástí působení LASERu tak, jak jej používá převážná část metod RP, takže může být využívána v běžném kancelářském prostředí. Stavebním materiálem součástí je termoplastický materiál, většinou se jedná o ABS ve tvaru drátu.

Drát z termoplastického materiálu s průměrem cca 1,6 mm je odvíjen z cívky a je vytlačován do vyhřívané trysky. Drát je do trysky podáván kladkami, přičemž drát působí před vyhřívanou částí trysky jako píst, který umožňuje vytlačení nataveného materiálu z trysky ven. Drát – stavební materiál, je po opuštění trysky kladen na podložku nebo předcházející vrstvu, ochlazuje se a tuhne. V okamžiku položení na předchozí vrstvu dochází k jeho spojení s vrstvou předchozí. Trysková hlava obsahuje dvě trysky. Jedna je určena pro pokládání materiálu součástí, druhá slouží ke kladení materiálu podpor. Hlava se pohybuje v rovině X – Y. Vytvářená součástka uložená na základní desce – podložce se po vytvoření vrstvy sníží o tloušťku nanášené vrstvy a začne nanášení další vrstvy. Pro podepření převislých ploch součástí je nutné použít podpurné konstrukce. Jsou vygenerovány obslužným programem nejčastěji jako tenkostěnné profily z materiálu podpor. Pro stavbu podpor používá firma Stratasys dvě technologie: systém Support Works (BASSTM - materiál podpor se vyznačuje tím, že obsahuje aditiva která mají za následek že jsou podpory křehčí a tedy se snadněji lámou při jejich odstraňování), který umožňuje lehké mechanické odstranění podpor a systém Water Works, kde se podpory rozpouštějí v roztoku vody a kyseliny citrónové.

Trysková hlava a podložka jsou umístěny ve vyhřívané komoře, ve které se udržuje stálá teplota. Tato teplota zajistí optimální spojení a zchladnutí spojovaných vláken. Teplota tavení drátu je 260°C, která je nastavena tak aby drát byl se stavu plastickém. Prototypové součástky zhotovené technologií FDM se dále dokončují dle požadavků na jejich použití. Podle vnitřní struktury součástí je možné materiál dodatečně vrtat, řezat závity, brousit nebo provádět povrchové úpravy – tmelení, barvení.



Obr.25 Princip metody Fused Deposition Modelling

Metoda FDM používá materiály na zhotovení prototypových součástí, které jsou inertní a netoxické. Jsou vhodné pro širokou oblast aplikací. Cívky drátu jsou umístěné v kazetách. V současné době nejnovější výrobní zařízení firmy Stratasys pracují se čtyřmi základními druhy materiálů:

- **ABS** – akrylonitril-butadien-styren (P400) - oblast výroby funkčních prototypů a vzorků
- **ABSi** – methyl-methakrylát - ABS (P500), dovolující sterilizaci gama paprsky pro aplikace v medicíně.
- **Eleastomer** (E20) je používán pro oblast, kde je požadována pružnost prototypové součástky (modelu), jako například při výrobě různých těsnění a pružných spojovacích prvků, při aplikaci v obuvnickém nebo automobilovém průmyslu. Má vlastnosti podobné polyetylenu a polypropylenu.
- **Vosk** (ICW06) najde uplatnění v mnohých slévárnách na rychlou výrobu modelů pro zaformování do keramické skořepiny (metoda vytavitelného modelu). Dnes je na zhotovení vytavitelného modelu stále více využíván materiál ABS a model je z formy vypalován za vysoké teploty. Materiály ABS a ABSi jsou dodávány v různých barvách nebo modifikacích barev podle přání zákazníka. Změna použitého materiálu může být provedena během několika minut. Součástky zhotovené z materiálu ABS jsou pevné a ve většině případů přímo vhodné pro testování jako funkční prototypy, pro smontování do sestav nebo na vytvoření finálního výrobku.

Technologická metoda FDM nachází velké uplatnění u mechanicky namáhaných dílů i v kombinaci s tepelným zatížením. Technologie je výhodná pro výrobu jednoho zatěžovaného vzorku pro zkoušky a ověření funkčnosti. Při požadavku více kusů je nevýhodná a finančně náročná. Většímu využití jako prostředku pro přípravu formy či nástroje brání náročnější způsob povrchové úpravy s ohledem na mechanické vlastnosti použitelného materiálu ABS.

### **Zařízení FDM firmy Stratasys:**

- Dimension BST/SST
- Prodigy - Office Modeling
- FDM 3000 - “Hands Free“ Prototyping
- FDM Quantum - Magna Drive System.
- FDM 200mc
- FDM Vantage
- FDM Titan
- FDM Maxum

Výrobní zařízení Prodigy a Dimension jsou určena přímo pro práci v kanceláři. Rychlost, snadná obsluha, nenáročná údržba jsou hlavní předností těchto zařízení. Výrobní zařízení FDM 3000 „Hand Free“ Prototyping je určené na rychlou výrobu přesných součástek, využívající technologii Water Works. Systém Water Works umožňuje lehké odstranění podpor z vyrobených součástek a poskytuje tak prostor na výrobu tvarově složitých součástí ale i sestav (například model kuličkového ložiska).

Výrobní zařízení FDM Quantum FDM MagnaDrive System je zařízení nejvyšší třídy dodávané firmou Stratasys. Je určené pro velké a tvarově náročné součástky. Zařízení se vyznačuje vysokou přesností výroby a dobrou kvalitou povrchu vyrobených součástek. Shodné součásti vyrobí v kratším čase než předchozí typy.

Systému MagnaDrive je určen k řízení pohybu tryskových hlav. Hlavy se pohybují v magnetickém poli na vzduchovém polštáři. Systém SmartSpool informuje přesně o množství zbývajících materiálu na cívkách. Příprava potřebných dat pro výrobu zabezpečuje software QuickSlice.

Vyrobenou součást je možné přímo použít k testům (po odstranění podpor) nebo je podle následujícího použití provedena odpovídající povrchová úprava:

- odstranění podpor (mechanicky nebo chemicky, v závislosti na typu zařízení)
- broušení
- tmelení větších nerovností stěrkovým tmelem + broušení pod vodou
- stříkání výplňovým tmelem – odstranění drobných nerovností + broušení pod vodou
- stříkání základovou barvou
- stříkání barvou (akrylátové barvy)

Z výše uvedeného postupu je zřejmé, že dokončovací operace mají podstatný vliv na celkovou dobu výroby prototypové součásti.

Celá řada amerických univerzitních a výzkumných institucí (Putgers University, Allied-Signal, Lone Peak Engineering, Advanced Ceramics Research) provádí výzkumné a aplikační aktivity s využitím technologické metody Fused Deposition Modeling s uplatněním termoplastických vláken a vláken s keramickým práškem.

**Výhody:**

- Velká rozmanitost použitelných barev materiálů a jejich lehká výměna
- Několik druhů stavebních materiálů a jejich lehká výměna
- Snadná obsluha zařízení
- Stavební materiál ani materiál podpor nejsou toxické látky
- Vytváření součástí není doprovázeno chemickými změnami.
- Relativně nízká pracovní teplota zapříčiňuje zanedbatelný úbytek objemu a zanedbatelné vnitřní napětí

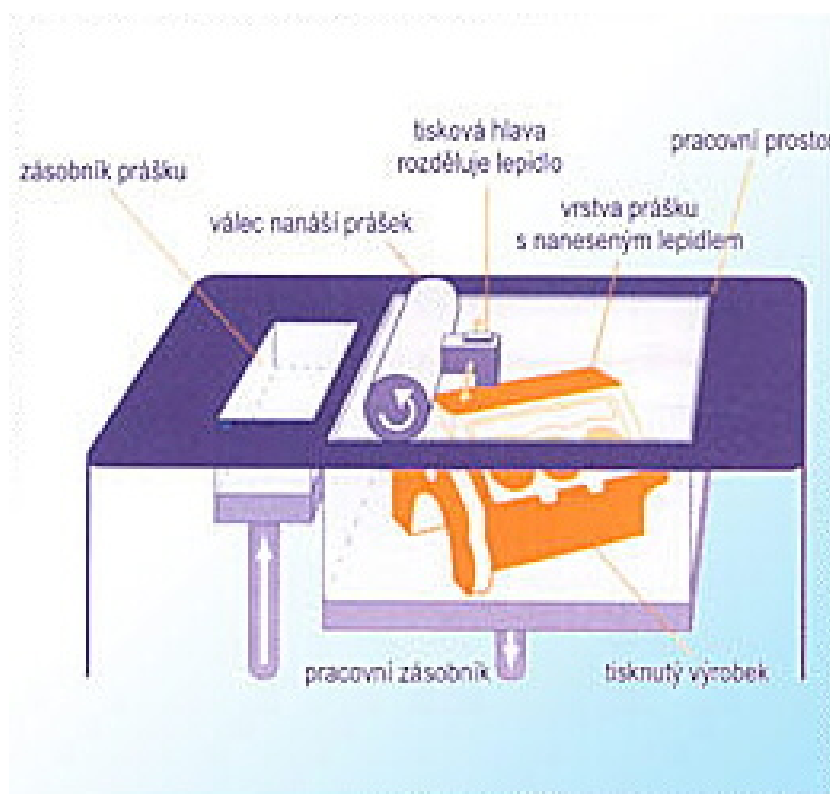
**Nevýhody:**

- Možnost vzniku trhlinek (nespojností) mezi jednotlivými vrstvami
- Nutnost použití podpůrné konstrukce – zvyšuje se spotřeba materiálu a prodlužuje doba výroby
- Plochy jsou po dokončení drsné – vykazují poměrně značnou schodovitost – prodlužuje se doba potřebná na dokončovací operace

## 5.6. Three Dimensional Printing ( 3DP )

Technologie RP označovaná pojmem Three Dimensional Printing (3DP) byla vyvinuta technologickým institutem Massachusetts Institute of Technology Cambridge – MIT jako metoda pro ověření prvních „green“ předlisků pro aplikaci technologie práškové metalurgie. Metoda 3DP je v současnosti komerčně nabízena firmou Soloven Corporation pod označením Direkt Shell Production Casting - DSCP a je používána zejména na výrobu keramických skořepin a formy pro odlitky.

Metoda 3DP je svým principem velmi podobná metodě SLS. Hlavní rozdíl spočívá v nahrazení laseru tryskovou hlavou vystřikující pojivo (např. koloidní silici) do vrchní práškové vrstvy řezu základního materiálu (např. z kysličníku hlinitého). Vyráběné součásti jsou umístěny na pracovní desku v komoře stroje a při výrobě jsou obklopeny práškovým materiálem. Částice prášku jsou spojeny v místech, kde bylo aplikováno tekuté pojivo. Po dokončení tvorby jednoho řezu se pracovní píst posune vertikálně směrem dolů o tloušťku vrstvy. Dávkovací zařízení nanese vrstvu práškového stavebního materiálu. Po dokončení zdvihu dávkovacího zařízení je prášek rovnoměrně rozprostřen a stlačen k vrchní části pracovní komory pomocí válce. Tento proces se opakuje tak dlouho, dokud není vyrobena celá součást, případně součásti. Po dokončení procesu výroby je pracovní deska vyzdvihnuta nad pracovní komoru a ručně (kartáčem) nebo pod tlakem (vysavač) je očištěn od nepoužitého práškového materiálu.



Obr.26 Princip metody Three Dimensional Printing (3DP)

**Metoda 3DP je využívána několika firmami:**

- firma Soloven - výroba forem z keramických prášků
- firma MTS Systems - přímá výroba kovových nástrojů
- firma Specific Surface - výrobu keramických filtrů pro uhelné elektrárny
- firma Z-Corporation – výroba prototypových součástí ze sádry spojované glukózou

**Výhody:**

- levná a rychlá výroba
- možnost vytváření velmi složitých tvarů
- vhodná pro kancelářské použití
- z vyrobených modelů se mohou zhotovit formy na výrobu odlitků
- je možné vytvářet barevné modely

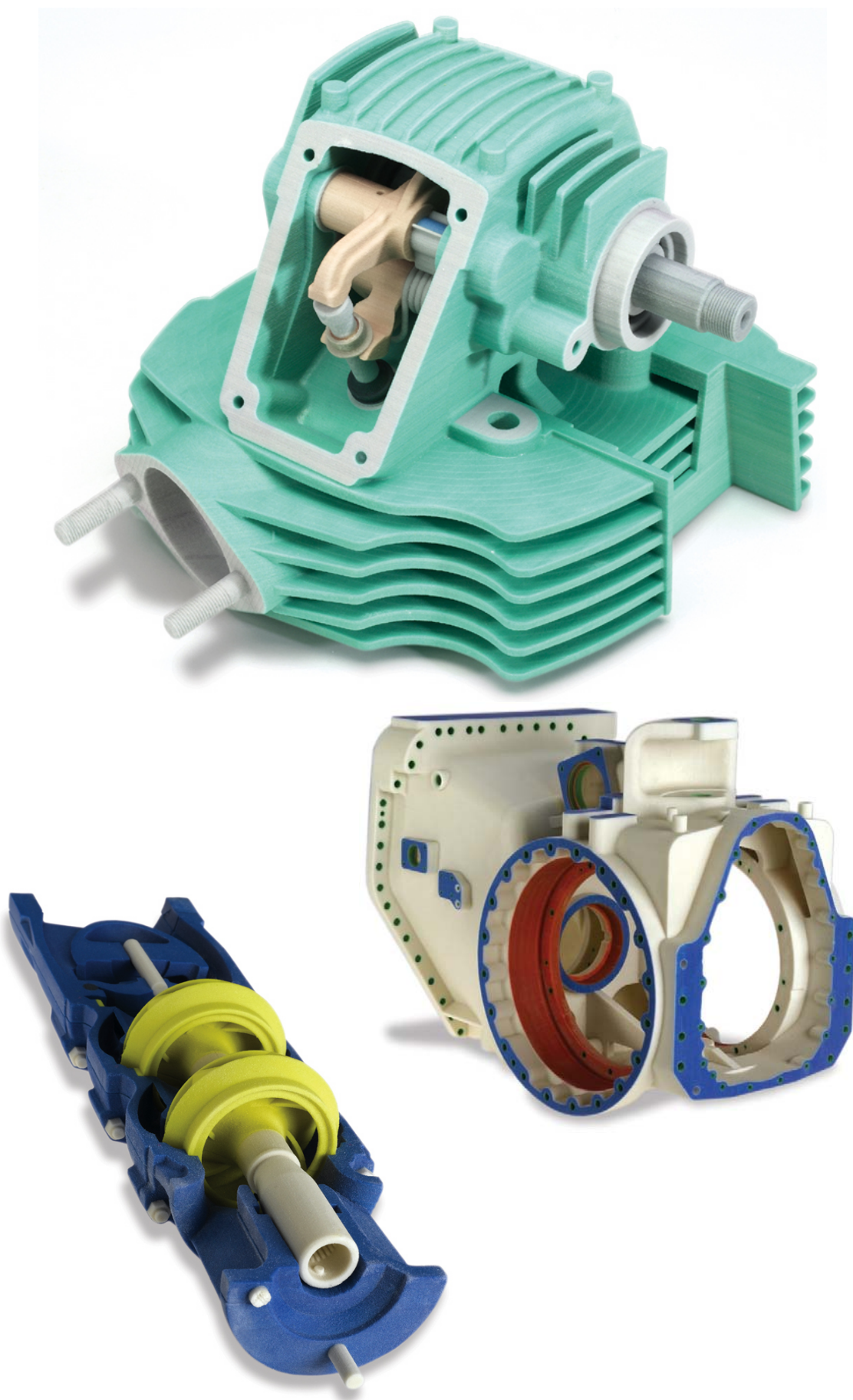
**Nevýhody:**

- používaných základních materiálů je málo a nejsou technologického charakteru
- plochy součástí jsou po dokončení drsné, nejsou odolné proti otěru, musí se separovat – prodloužení doby dokončení výrobku
- Potřebné zařízení pro odstranění prášku z vnitřních dutin výrobku

**Používané materiály:**

Prášek	zp14	zp130
Složení	škrob/celulóza	sádra
Tloušťka vrstvy	0.1mm - 0.25 mm	0.0762 - 0.1 mm
Pevnost výrobků	4 MPa	10 MPa
Možnosti opětovného využití nepoužitého prášku	ano	ano

Tabulka 2



Obr.27 Součásti vyrobené metodou Three Dimensional Printing (3DP)





Obr.28 3D-tiskárna Spectrum Z510 společnosti ZCORPORATION  
(rozlišení 600 x 540 dpi, pracovní prostor 254 x 356 x 203 mm, 2 vrstvy za min.)



Obr.29 Odlitek z formy vyrobené metodou 3DP



### **5.7. *Ballistic Particle Manufacturing ( BPM )***

Nanášení vrstvy roztaveného materiálu pomocí trysek používá technologie RP s názvem Ballistic Particle Manufacturing (BPM). Metoda byla vyvinuta a komerčně využita firmou BPM Technology, Inc. Pro vystřikování stavebního materiálu používá piezoelektrický tryskový systém. Trysky nanášejí mikroskopické kapky roztaveného pojiva na stavební materiál a spojují jej do kompaktního celku. Metoda BPM vyžaduje tvorbu podpor pro převislé plochy nebo nespojné části modelu. Tisková hlava je namontována na 5ti-osém polohovacím zařízení a vstřikuje pojivo na vytvářený řez prototypové součástky.

Jedním z výrobců využívajících ve svých zařízeních princip technologie BPM je firma Solidscape, Inc. (dříve Sanders Prototypes). Vytváření modelů (prototypových součástek) používá nízko tavitelné termoplasty a pomocné voskové materiály. Kromě toho obsahuje řezací desku na ofrézování každé vytvořené vrstvy na danou tloušťku. Výrobní zařízení používá jednu tiskovou hlavu pro základní materiál a druhou tiskovou hlavu pro podpůrný materiál. Základní plastický materiál a vosk jako podpůrný materiál jsou uskladněny v roztavené tekuté formě při zvýšené teplotě ve speciálních nádržích. Kapalně materiály jsou individuálně napojené na tiskové hlavy tepelně izolovaným potrubím. Trysky umístěné v tiskové hlavě vystřikují kapky materiálu. Materiál tvrdne po dopadu na požadované místo. Po úplném vytvrdnutí celého řezu, přejede po povrchu řezu frézovací hlava, která odstraní přebytečný materiál a vytvoří vrstvu konstantní tloušťky. Třísky vzniklé frézováním se odsávají odsávacím zařízením - filtrem, kde se zachytávají ve sběrné nádrži.

Pohyby tiskových hlav jsou snímány snímacím optickým zařízením. Jestliže je vytvořená vrstva v pořádku, zdvihací zařízení posune pracovní stůl směrem dolů o tloušťku jedné vrstvy a je zahájeno vytváření dalšího vrstvy. Po dokončení výroby modelu, dochází k roztavení voskového podpůrného materiálu a k jeho následnému oddělení od vytvořeného modelu.

Součást vyrobená technologií BPM se vyznačuje velmi dobrým vzhledem povrchu, kdy pro mnoho aplikací není potřebné provádět dokončovací operace.

#### **Výhody:**

- Velká rozmanitost použitelných stavebních materiálů a jejich lehká výměna
- Nízké náklady na údržbu zařízení
- Rychlá tvorba tenkostěnných součástí
- Proces výroby vyžaduje minimální zásahy obsluhy
- Nepoužívají se toxické látky
- Při výrobě nedochází k chemickým změnám a součást je minimálně ohřívána (zanedbatelný úbytek objemu a zanedbatelné vnitřní napětí)

**Nevýhody:**

- Současné nanášení základního a podpůrného materiálu.
- Stavba součásti vyžaduje výrobu podpůrné konstrukce
- Větší plochy v řezu si vyžadují delší čas na jejich tvorbu
- Kolísání teploty v průběhu výroby může vést k nespojení vrstev
- Mechanické vlastnosti součásti jsou závislé na směru kladení vrstev

### **5.8. *Multiphase Jet Solidification ( MJS )***

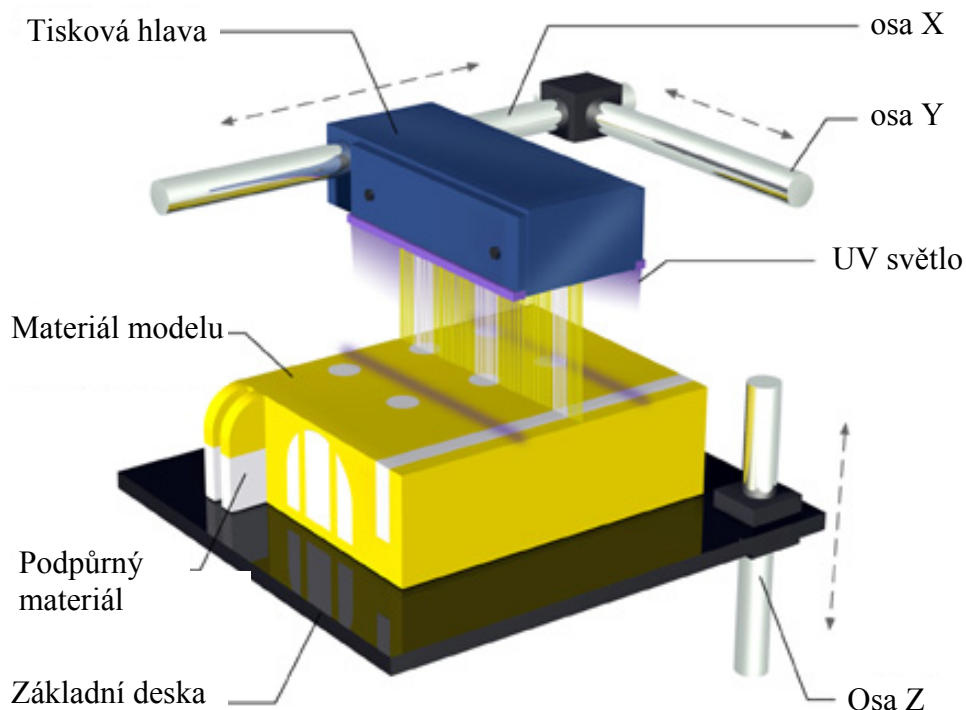
Multiphase Jet Solidification (MJS) je technologická metoda RP, která využívá princip vytlačování stavebního materiálu. Vývoj technologie MJS je výsledkem spolupráce výzkumného pracoviště IFAM (Fraunhofer – Institut für Angewandte Materialforschung Bremen – vývoj stavebních materiálů) a firmy IPA (Stuttgart – ovládací software). Princip technologie MJS je založen na vytlačování řídké směsi tvořené kovovým práškem s keramickým materiálem a vosku v poměru 50:50. Směs je uložena ve vyhřívaném zásobníku a vytlačuje se pevnými otvory - tryskami. Dopravovaný materiál má teplotu 200°C (teplota zkapalnění pojiva a dosažení požadované viskozity).

### **5.9. *Multi JET Modelling ( MJM )***

Firma 3D Systems, Inc. vyvinula technologickou metodu RP pod názvem Multi-Jet Modeling (MJM). Princip metody spočívá v nanášení jednotlivých vrstev termopolymeru postupně na sebe pomocí speciální tiskové pracovní hlavy. Hlava má 96 trysek uspořádaných rovnoběžně vedle sebe. Průtok nanášeného materiálu je pro každou trysku samostatně řízen programem. Model se opět vytváří na zvláštní nosné desce podobně jako u Stereolitografie. Pracovní hlava se pohybuje nad nosnou deskou ve směru osy X. Jestliže je součástka širší jak pracovní hlava, posouvá se ve směru osy Y tak, aby se vytvořila celá součástka. Velký počet trysek zaručuje rychlé a rovnoměrné nanášení materiálu. Nanášený termoplastický materiál ztuhne při styku s už naneseným materiálem.

### 5.10. PolyJet™ technology

Tato metoda je podobná metodě Multi JET Modelling, kde tisková hlava množstvím trysek nanáší materiál ze kterého vzniká výsledný model. Nanášený materiál je fotopolymer který je vytvrzován UV světlem ihned po nanesení vrstvy. Podpůrný materiál je rozpustný ve vodě. Princip je zobrazen na obrázku 30. Na obrázku 31 je zobrazen pohybový mechanismus a tisková hlava stroje EDEN 500V od firmy OBJED. Obrázek zachycuje též vyhotovený model.



Obr.30 Princip technologie PolyJet™



Obr.31 Pohybový mechanismus a tisková hlava

Firma OBJET dodává ke svým RP strojům stavební materiály které mohou být číré nebo barevné. Tvrdší materiály mají pevnost v tahu 50 – 60 MPa, kdežto měkčí pružné materiály mají pevnost v tahu 2 nebo 4,4 MPa. Na obrázku 32 je znázorněna výměna zásobníku se stavebním materiálem.



Obr.32 Výměna zásobníku

Udávané rozlišení 3D tisku RP strojů firmy OBJET řady EDEN je pro osy x y z 600 x 300 x 1600 dpi až 600 x 600 x 1600 dpi. Na obrázku 33 je vyhotovený model s rozlišením 3D tisku 600 x 300 x 1600 dpi. Díky poměrně

velkému rozlišení 3D tisku nejsou na modelu příliš patrné nerovnosti vzniklé schodovým efektem jako u jiné technologie. Při podrobnějším zkoumání povrchu modelu bylo pouhým okem zjištěno nepatrné zvlnění šikmých ploch v jedné ose což je způsobeno nižším rozlišením v této ose. Mechanické vlastnosti modelu se blíží vlastnostem plastu.



Obr.33 Vyhotovený model technologií PolyJet™

### **5.11. Metody rychlé výroby prototypů ve stádiu vývoje**

Přestože je pro výrobu prototypových součástí k dispozici velký počet průmyslově využívaných technologií, jsou ve výzkumu a vývoji připravovány a ověřovány další nové metody. Jedná se technologické metody, které nabízejí nová řešení. Cílem nových technologií je zkrácení výrobního času, zvýšení kvality povrchu dokončené součásti.

#### **5.11.1. Laser Engineered Net Shaping (LENS)**

Technologická metoda RP s názvem Laser Engineered Net Shaping – LENS dokáže vyrábět kovové prototypové součástky s dobrými metalurgickými vlastnostmi v krátkém výrobním čase. Metoda byla vyvíjena v univerzitních laboratořích v USA a v Evropě. Základní princip vytvořila společnost Sandia National Laboratory v Kalifornii, částečně ji komerčně využívá americká společnost Optomec Design Corp.

Základem výrobního zařízení je výkonný laser, který slouží k roztavení kovového prášku, dodávaného koaxiálně k ohnisku laserového paprsku prostřednictvím nanášecí hlavy. Laserový paprsek prochází středem hlavy, je zaostřen do malého bodu prostřednictvím optického systému skládajícího se z jedné nebo více čoček. Pracovní deska se pohybuje v rovině X-Y přírůstkovým způsobem. Nanášecí hlava se po dokončení každého řezu pohybuje vertikálně. Laserový paprsek je orientovaný a vedený pomocí nastavitelného úhlu zrcadla, nebo použitím optických vláken. Kovový prášek je dopravován a rozdělován okolo obvodu hlavice kde je navíc usměřován prouděním inertního plynu. V tomto případě není potřebný přívod ochranného plynu, který se obvykle používá na ochranu roztaveného kovu před atmosférickým kyslíkem (oxidace), pro zachování lepších mechanických vlastností a pro zvýšení přilnavosti jednotlivých řezů lepším smáčením spojovaných ploch.

Technologie je schopná pracovat se širokým spektrem materiálů (např. nerezavějící ocel, měď, hliník, titan). Stavební materiál je buď ve formě prášku, lze ale používat materiál ve formě tenkého drátu. Energie používaného laseru se v průběhu výroby reguluje podle právě prováděné činnosti v rozsahu od 100 W až do 20 kW i více (v závislosti na použitém materiálu, na rychlosti výroby a na dalších parametrech). Vyrobené prototypové součástky jsou hutné s velmi dobrou vnitřní strukturou a se stejnými, často i lepšími vlastnostmi jako součástky vyrobené standardními technologiemi.

### **5.11.2. *Koncepce kontrolované automatické výroby (DesCAF)***

Koncepce kontrolované automatické výroby (DesCAF) byla vyvinuta Efremem Fudimem v roce 1986. Tato technologická metoda je rozvíjena společností Light Sculpting Inc. Princip technologie lze považovat za jistou variantu technologie STL. Technologie DesCAF používá jako stavební materiál fotopolymer, který je ozářený a vytvrzený náraz skrz masku. Na rozdíl od metody SGC, která používá xerograficky generovanou masku. Metoda DesCAF používá na generování masky nezávislou standardní laserovou tiskárnu. Technologie se vyznačuje vysokou výrobní rychlostí, protože současně probíhá tvorba i použití masky.

### **5.11.3. *Quadra System***

Izraelská společnost Object Geometrie Ltd., začátkem roku 2000 uvedla technologii s názvem Quadra Systém. Tato technologie je založena na využití fotopolymerů jako stavebního materiálu. Pro výrobu součástí používá vstřikovací hlavy, která nanášení základní (stavební) a pomocný (podpory) materiál současně. Po osvětlení vyhotoveného řezu UV lampou namontovanou na vstřikovací hlavě je každý řez kompletně vytvrzený. Podpurný materiál (také fotopolymer) je po dokončení mechanicky odstraněn. Podpory jsou obslužným programem vygenerovány tak, aby se pevně nespojily se základním materiálem.

### **5.11.4. *Electrosetting material***

Technologii RP Electrosetting material vyvíjí laboratoř Navy Tailor Laboratory. Základním principem technologie je využití chování materiálů jako např. epoxid, silikon apod., kdy po zavedení elektrického pole se skupenství kapalně mění na pevné podstatně rychleji v místech kde působilo elektrické pole. Změnu skupenství v požadovaném místě zprostředkovává vhodně tvarovaná elektroda.

### **5.11.5. *CNC deposition method***

Technologie CNC deposition metod je vyvíjena na BUT. Základním principem technologie je tisková hlava s tryskami upnutá do vřetene CNC frézky. Stavebním materiálem je slévárenský vosk. Technologie je primárně určena na výrobu matečních modelů pro navazující slévárenskou technologii vytavitelného modelu. Trysky v revolverovém uspořádání slouží ke kladení vrstev různé tloušťky. Svým principem je velice podobná technologii FDM.

#### **5.11.6. Inkjet-based**

Technologii RP s názvem Inkjet-Based vyvíjí firma Ince Inc. Univerzita. Tato technologie je někdy považována za metodu Ballistic Particle Manufacturing a její princip je analogický s metodami, které používají pro vytváření součástek polymerní materiály. Základní rozdíl oproti jmenovaným metodám spočívá ve způsobu kladení stavebního materiálu. Technologie využívá speciální princip spojování částic kovu. Využívá vlastností roztavených kovů, kdy mají velmi nízkou viskozitu, je však komplikované jejich kladení v okamžiku, kdy opouštějí vstříkovací trysku. Technologie využívá smíšené eutektoidní slitiny (patentovaná slitina), která je vhodná pro kladení a spojování vrstev mezi sebou. Tato technologická metoda je velmi podobná metodě Fused Deposition Modeling a používané výrobní zařízení je podobné zařízení, které se používá při technologické metodě Net Shape Castings.

#### **5.11.7. Weld Deposition**

Několik společností a univerzit pracuje na vývoji technologické metody weld deposition. Patří mezi ně společnost Babco & Wilcox, Nottinghamská Univerzita a Furtská Univerzita. Tato technologická metoda využívá na vytváření součástek obloukové svařování, kde pracovní pohyb při vytváření jednotlivých vrstev vykonává průmyslový robot nebo je použito polohovací zařízení. Dosahovaná přesnost vytvořených součástek a technicko-technologické charakteristiky jsou v současné době nedostačující.

#### **5.11.8. Masked Deposition**

Výzkum a vývoj této technologie realizuje univerzita v Carnegie Mellon. Tato technologie využívá tenké kovové vrstvy nanášené plazmovým stříkáním kovových částic z hořáku skrze laserem vyřezávanou papírovou masku. Částice kovu okamžitě chladnou a jsou přilepeny k podkladu, nebo k předcházející vrstvě a vzniká prototypová součástka. Na výrobu masky je možné použít technologické zařízení LOM společnosti Helisys. Mezi hlavní problémy této metody patří nedostatečné spojení jednotlivých vrstev a vzniklé vnitřní napětí ve vytvořené součástce.



#### **5.11.9. *Laser Fusing***

Technologie RP s názvem Laser Fusing je zkoumána a vyvíjena v laboratořích Sandia National a je také využita společností Optomec design Corp. Stejný výzkum a vývoj probíhal také v jiných laboratořích a univerzitách v USA i v Evropě a je na různém stupni průmyslového zavedení. Práškový kov je vrstvený na předcházející vrstvy za působení intenzivního impulzu laserového paprsku v ochranné atmosféře inertního plynu. Prototypová součástka je vytvořena s dobrými tolerancemi a technicko-technologickými charakteristikami.

## **6. Rychlá výroba forem – Rapid Tooling.**

Jednou z možných navazujících činností po vyrobení prototypové součásti nebo matečního modelu (v závislosti na dalším použití součásti) je realizace ověřovací série prototypových součástí z provozních materiálů. Všechny způsoby výroby využívají technologie odlévání nebo vstřikování do forem.

Technologie RP vytváří master modely – modely pro zaformování, které není možné bez dodatečné povrchové úpravy použít v přímém nebo nepřímém navazujícím procesu. Žádná z technologií RP nevytváří povrch součásti v odpovídající kvalitě. Hotový model se vyznačuje schodovitou (stair-stepping) strukturou povrchu a obsahuje například i stopy po podporách. Povrchová úprava spočívá v broušení, tmelení a lakování. Všechny tyto činnosti mají vliv na konečnou přesnost master modelu. Pokud jsou na modelu některé rozměry tolerovány (rozteče otvorů, rovinnost ploch a další) je nutné použít pro dokončovací operace například CNC obrábění.

### **Technologie Soft Tooling**

Formy se vyrábějí nepřímým nebo přímým postupem. Základním typem malosériové výroby forem nepřímým způsobem je měkká forma, nejčastěji vyrobená ze silikonu. Forma vznikne zalitím master modelu silikonem vytvrditelným při pokojové teplotě. Měkké formy jsou vhodné pro výrobu do 50 až 200 kusů (v závislosti na složitosti formy). Materiály používané pro odlévání: urethane, epoxy, polymers.

Pro výrobu většího množství součástí je nutné použít vstřikovacích forem (injection mold) z odolnějších materiálů, např.:

- **Aluminum filled Epoxy** – vstřikovací formy z tohoto materiálu jsou vhodné pro málo komplikované tvary a série do 1000 kusů
- **Sprayed Metal Tooling** – formy jsou vhodné pro málo komplikované ale rozměrné součásti
- **Kirksite Tooling** – formy mají vyšší rozměrovou stálost a jsou hodné pro komplikované součásti

Základem malosériové výroby forem přímým způsobem je vyrobení přímo zařízením RP. Formy jsou většinou vhodné pouze pro nízkoteplotní plasty nebo pro vosky. Počet kusů je 10, maximálně 50 kusů. V současnosti je možné formy vyrábět metodou Cooper Polyamide ze směsi prášků měď-polyamid. Měď je spojována pomocí roztaveného polymeru nylonu nebo Direct Metal Laser Sintering - forma ze slitin bronzu. Oba typy forem dovolují vyrábět až několik tisíc kusů výrobků.

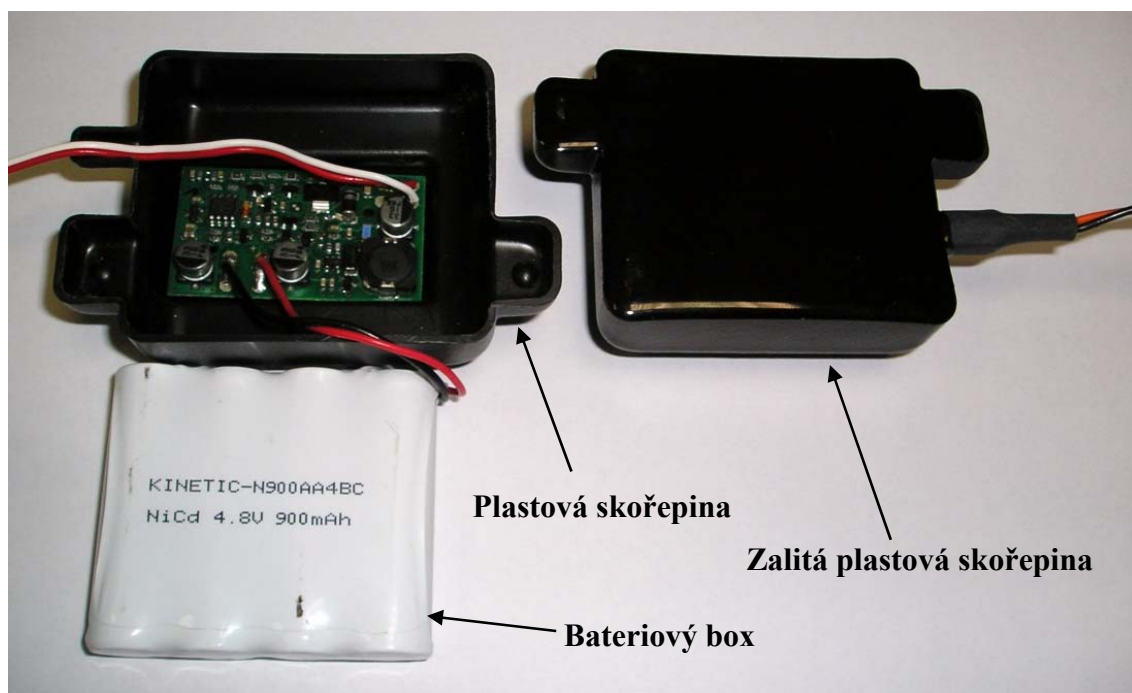
## **Technologie Hard Tooling**

Při požadavku na výrobu ověřovací série několika tisíc kusů je nutné využít některou z technologií Hard Tooling. Jedná se o výrobu součástí tlakovým litím do kovových forem. Kovové formy však nejsou vyráběny třískovým obráběním, ale jedná se o odlitky z master modelu vyrobeného strojem RP. Metody rychlé výroby nástrojů „Rapid Tooling“ jsou založeny na metodách systému „Rapid Prototyping“, například firma 3D Systems se zaměřuje na možnost výroby nástrojů pro různé aplikace (kovací zápustky, lisovací nástroje, formy pro výlisky z plastických hmot) s požadavkem na minimalizaci časových nároků přechodu od RP modelu k výrobě součástí z průmyslových plastů (ABS, polypropylén, polykarbonát, polyuretan). Tyto průmyslové plasty mají široké možnosti použití ve výrobě díky dobrým mechanickým vlastnostem a tepelné odolnosti. Princip těchto metod spočívá ve vytvoření „master modelu“ libovolnou RP technologií.

## 7. Zhotovení konkrétního modelu.

### 7.1. *Virtuální 3D model.*

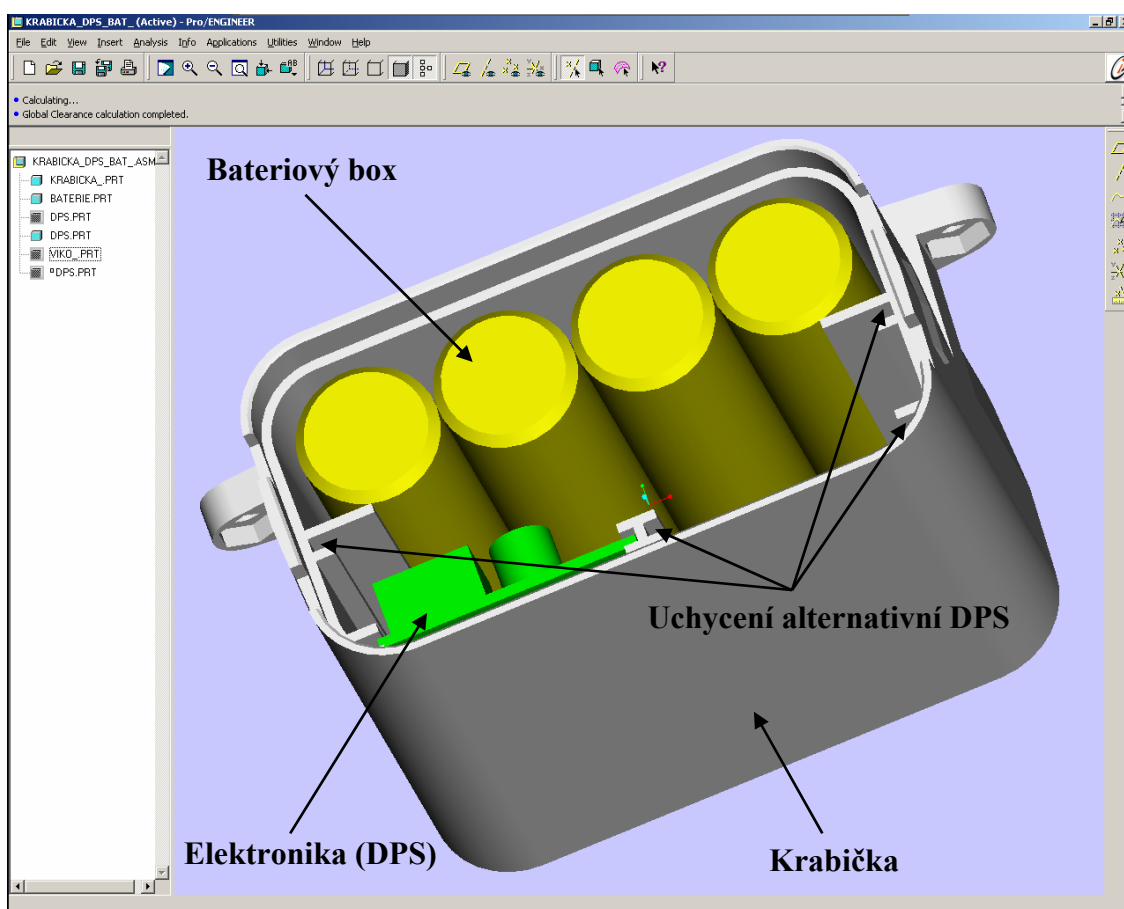
Firma Jablotron s.r.o vyrábí bateriový záložní zdroj BB-02 (battery backup). Jde o inteligentní záložní zdroj určený primárně pro záložní napájení autoalarmu nebo i jiného zařízení. Tento zdroj je zkratuvzdorný, při napětí nad 10 V dobíjí bateriový článek a pod napětí 9 V se stává zdrojem energie pro zálohování napětí. Původní mechanická koncepce je na obrázku 34.



Obr.34 Původní mechanická koncepce výrobku BB-02

V původní vývojové koncepci je elektronika umístěna do plastové skořepiny a následně zalita izolační hmotou. Tato koncepce je v rámci prvotního vývojového kroku dostačující nicméně se ukázalo že tento způsob zakrytování výrobku je cenově nevýhodný. Proto bylo po průzkumu trhu přikročeno k dalšímu vývojovému kroku a to k vytvoření plastové krabičky. Požadavek na tuto krabičku je nízká cena a vysoká univerzálnost pro použití i v jiných výrobcích. V rámci tohoto projektu bylo cílem analyzovat náročnost a efektivnost vývoje prototypového modelu v závislosti na použité technologii a materiálu.

Virtuální 3D model byl vytvořen v programu PROENGINEER, viz obrázek 35.



Obr.35 Model krabičky BB-02 v programu PROENGINEER

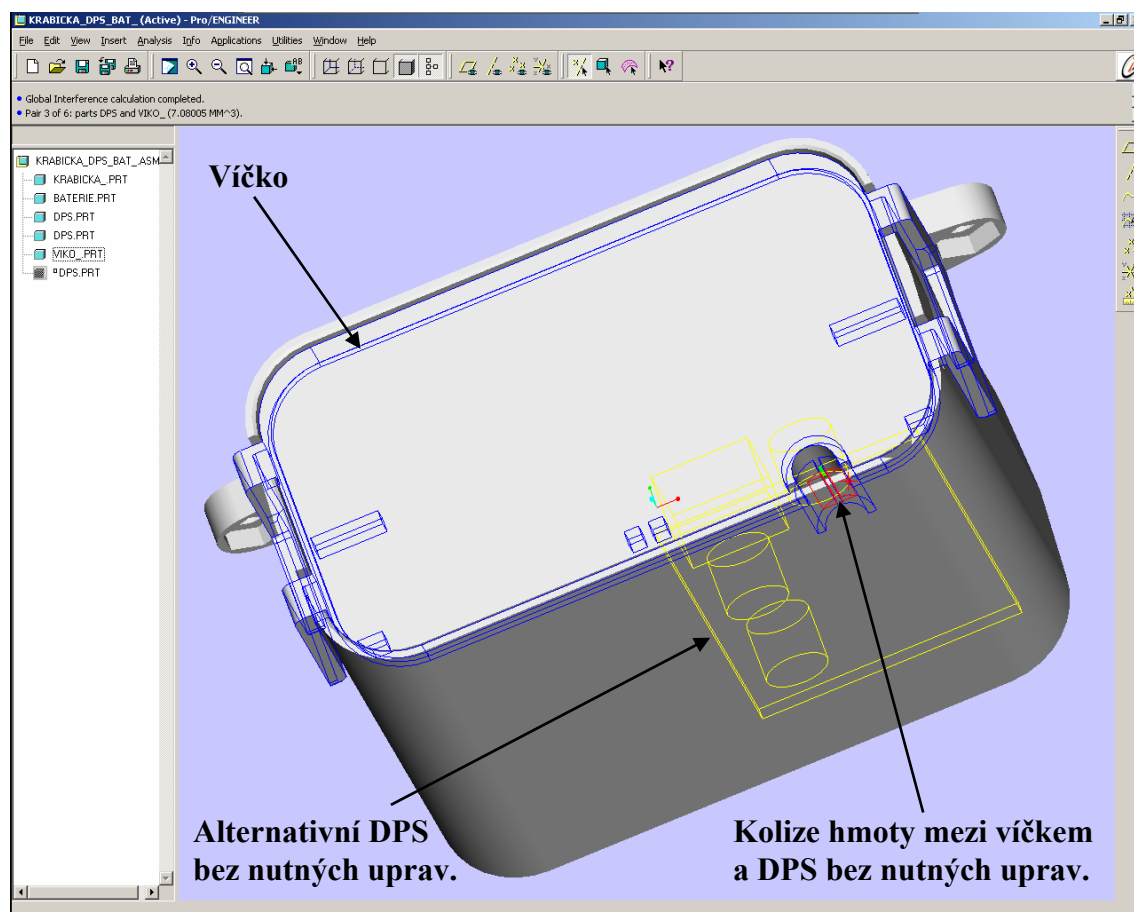
Model v sobě zahrnuje plastovou krabičku (šedá barva), desku řídicí elektroniky (zelená barva) a model bateriového boxu (žlutá barva). Z tohoto pohledu je patrné že při tvorbě modelu bylo přihlédnuto i k univerzálnosti krabičky, kdy je možné mechanicky upevnit i jinak velkou desku s elektronikou do jiných míst či místo bateriového boxu umístit jinou elektroniku jako jsou například relé a podobně. Při tvorbě modelu byla řešena zástavba možných alternativ umístění komponent uvnitř krabičky. Dále bylo přihlédnuto k řešení upevnění výrobku do prostoru vozidla. Jako další kritérium lze uvést stupeň krytí krabičky, tj. odolnost proti vnikání mechanických částic a vody. Protože nebyla požadována vodotěsnost bylo řešeno zabránění vniku kapající vody do vnitřku krabičky a případná vzdušnost pro možnost samovolného vysušení prostoru a zabránění případné korozi kovových částí elektroniky. Víčko se ke krabičce uchycuje pomocí pružných úchytů a výstupku na krabičce.

Tato krabička je vhodná pro montáž do motorových vozidel i domovních systémů. Vlastnosti použitého plastového materiálu určí zda bude možno tuto krabičku použít pro montáž do motorového prostoru kde je dle normy požadována vyšší teplotní odolnost.

Z hlediska technologie bylo přihlédnuto k vyrobiteľnosti krabičky. Krabička se bude vyrábět metodou vstřikování plastu do formy. Forma bude dělena z vnější strany krabičky do dvou částí a z vnitřní strany bude formu představovat vysouvateľné jádro.

Pro způsob výroby byly provedeny na modelu potřebné technologické úpravy jako jsou zkosení stěn a jiné úpravy.

Model byl v této části vývoje podroben zástavbovým zkouškám. Z následujícího obrázku je patrné že v označené pozici pro umístění DPS je kolize mezi neupravenou DPS a víčkem (označená červeně). Kolidující část víčka je určena pro uchycení kabeláže a v případě použití této pozice pro upevnění DPS je nutno přihlídnout při návrhu DPS na tuto možnou kolizi hmoty.

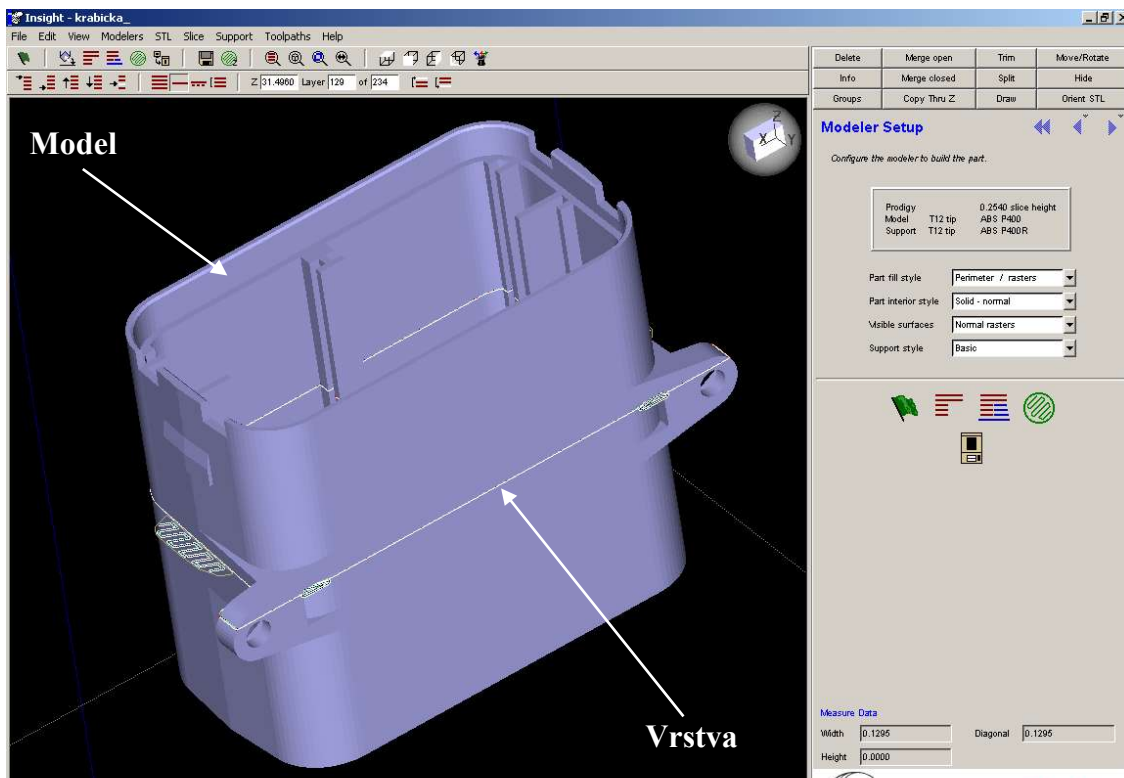


Obr.36 Zástavbová analýza modelu krabičky

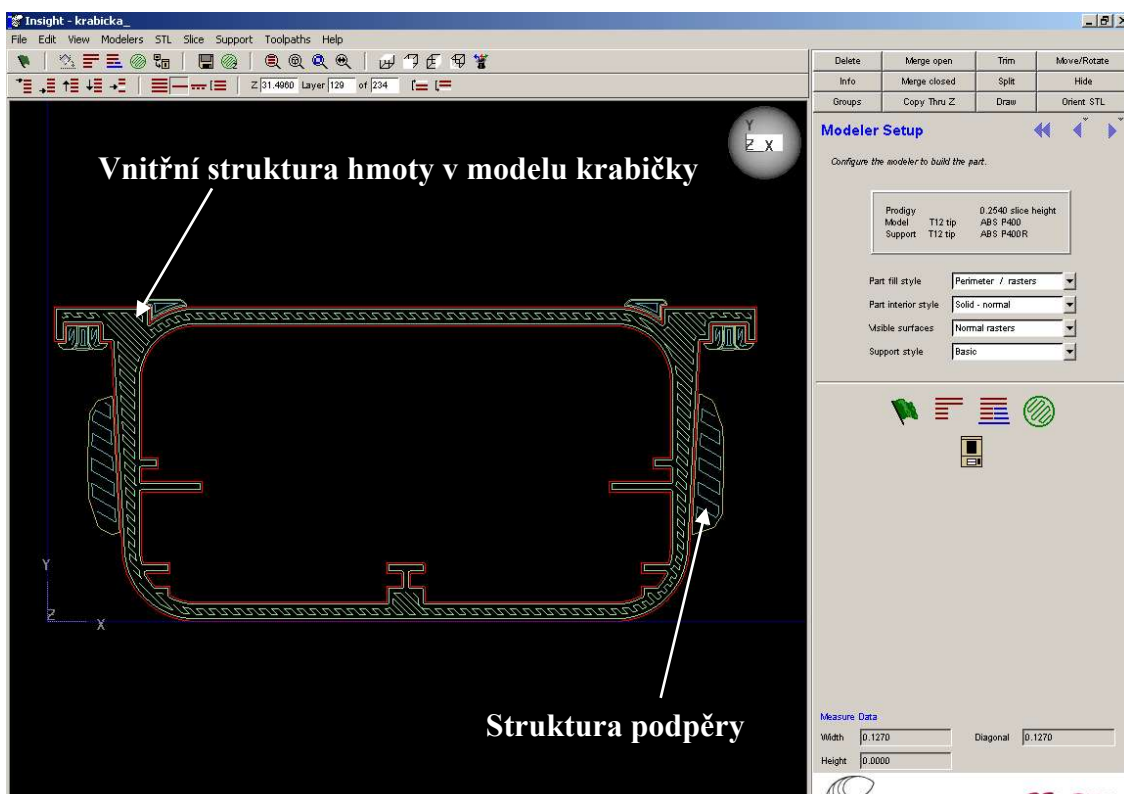
Dalším krokem bylo vygenerování STL dat pro zhotovení reálného modelu. Tvorbou modelu jsou věnovány následující kapitoly.

## 7.2. Zpracování dat pro metodou FDM.

Vygenerovaná data STL byla zpracována programem INSIGHT který je uživatelskou součástí systému PRODIGY.

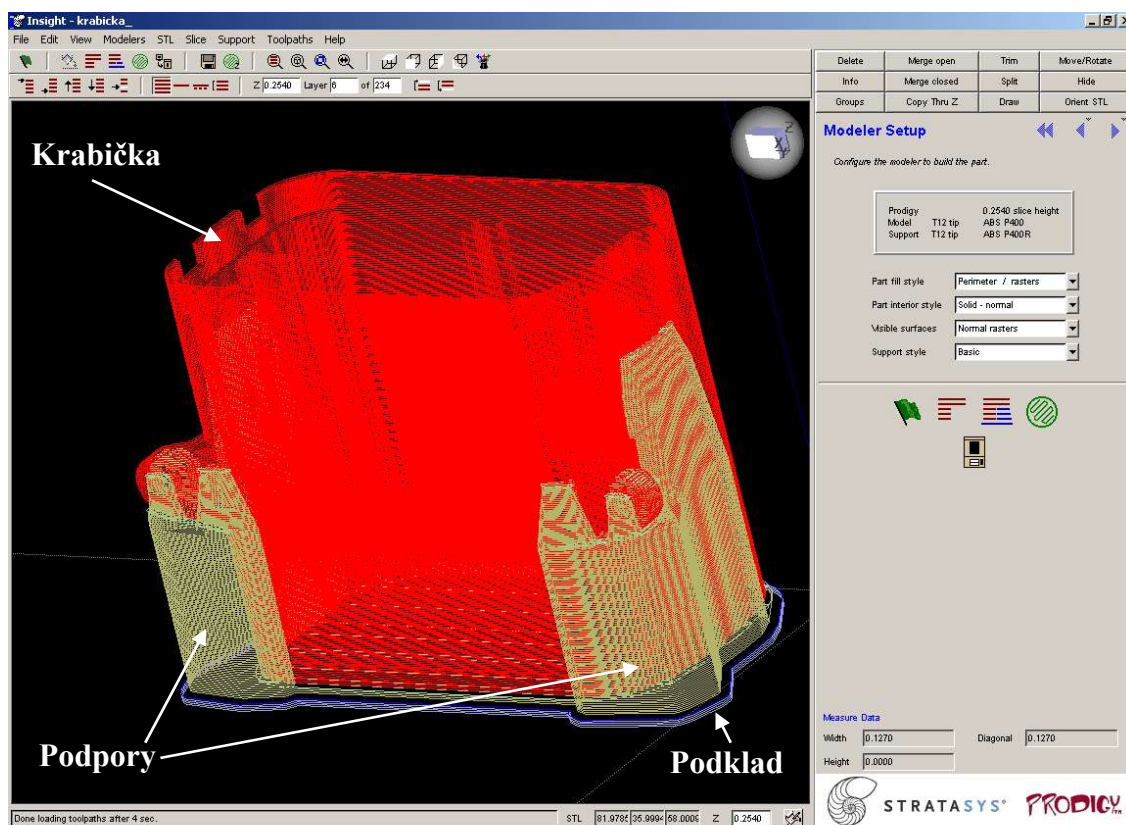


Obr.37 Zpracování STL dat programem INSIGHT

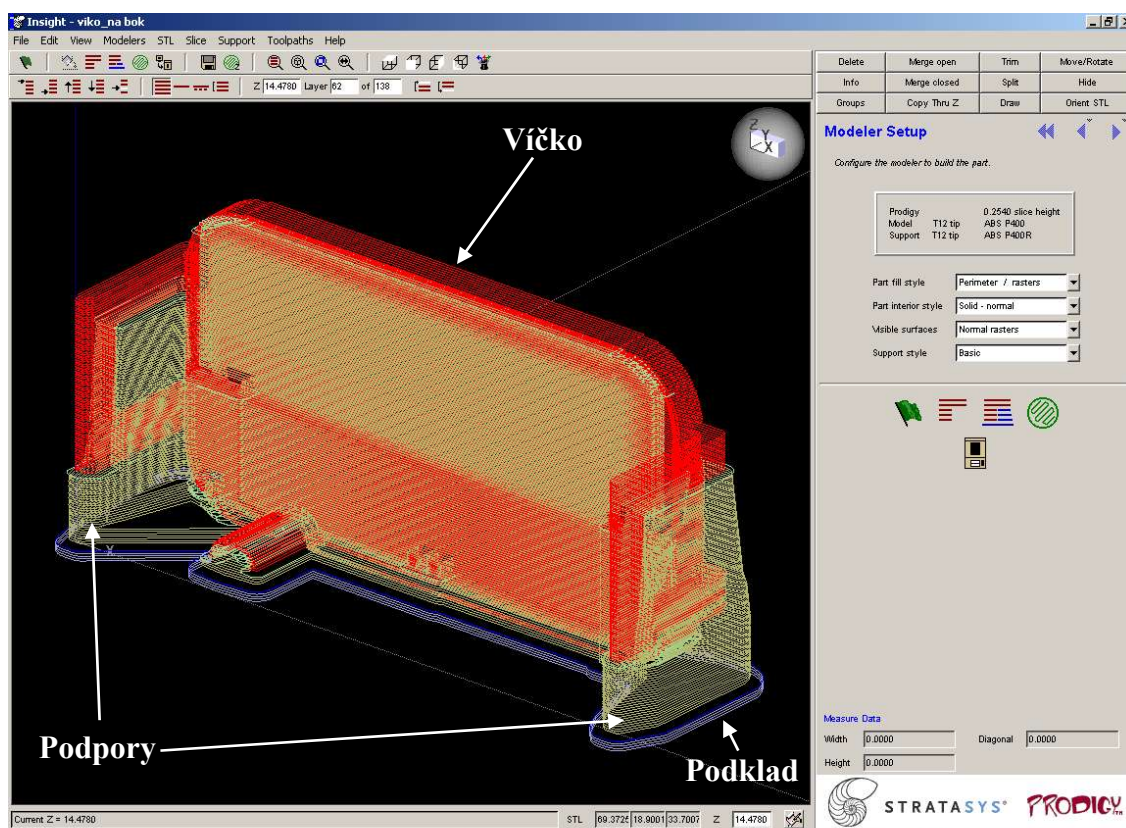


Obr.38 Vnitřní struktura hmoty v modelu



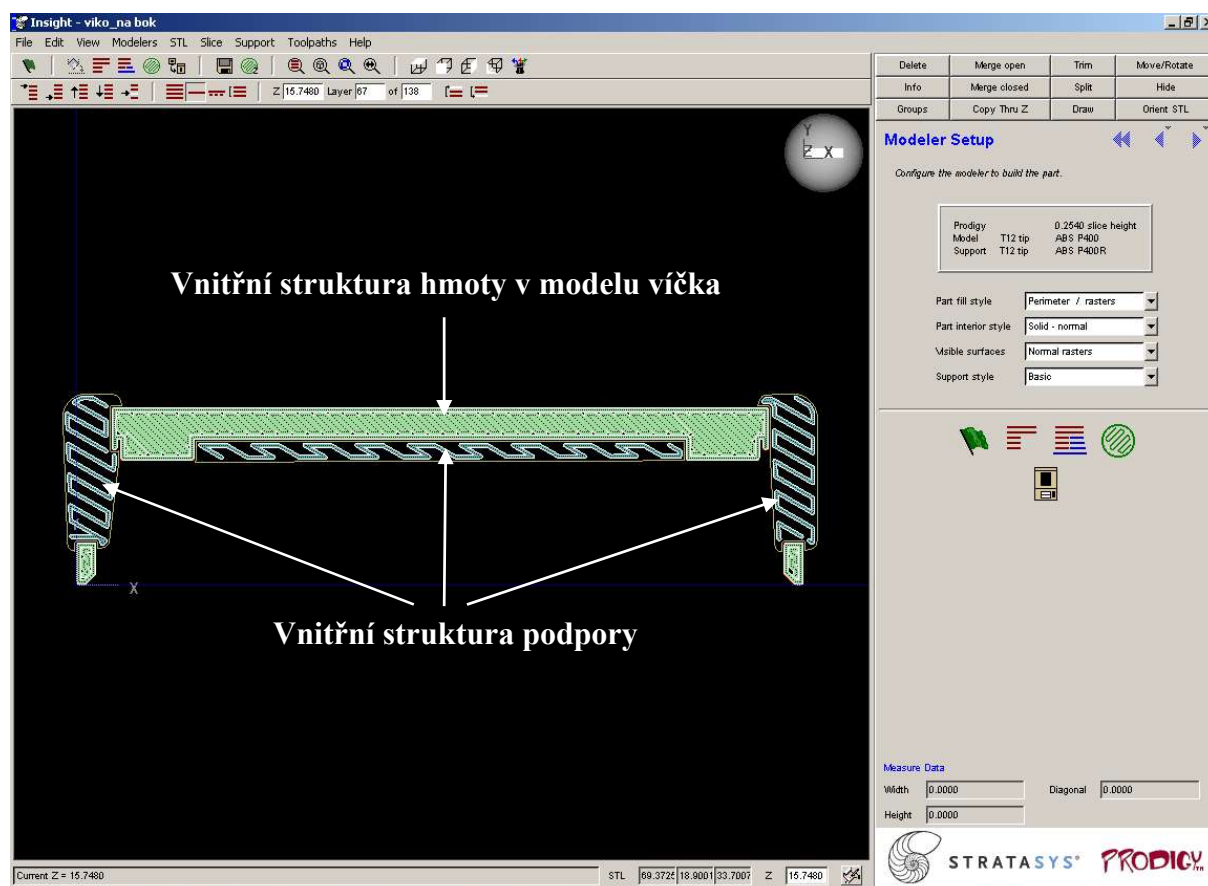


Obr.39 Zobrazení vrstev krabíčky a potřebných podpor.



Obr.40 Zobrazení vrstev víčka a potřebných podpor.





Obr.41 Zobrazení jedné vrstvy víčka.

Jak je patrné z předchozích obrázků program automaticky navrhne rozložení vrstev a jejich strukturu v modelu. Model má povrch tvořený homogenní skořepinou a vnitřek modelu je vyplněn hmotou v podobě mřížky pod úhlem  $45^\circ$  (úhel lze zvolit) tak aby každá následující vrstva měla tuto mřížku kolmou na předcházející vrstvy. Tímto způsobem se šetří použitý materiál a znatelně urychluje tvorba fyzického modelu.

Program vyžaduje vstupní data a také umístění modelu v prostoru. Umístění modelu je rozhodující pro dobu zpracování a má vliv na mechanické vlastnosti modelu vzhledem k nanášení vláken. Dalším důležitým prvkem který je ovlivněn umístěním modelu je množství materiálu potřebného pro vytvoření podpor. Například pokud by byla krabice položena na bok bylo by nutné vnitřek krabice vyplnit podpůrnou hmotou. Tato zbytečná hmota by ovlivnila nejen dobu tvoření modelu, jeho cenu ale také by bylo nutno ji z vnitřku krabice pracně odstranit. Fyzický model má kromě podpor také podporu v podobě podložky ze stejného materiálu jako jsou samotné podpory na kterou se nanášejí první vrstvy materiálu a která slouží k oddělení modelu od pohyblivého stolu stroje.

Kromě vygenerovaných dat pro práci stroje program také vygeneruje informace které slouží k výpočtu ceny modelu jako je celkový čas a množství potřebné hmoty viz obr 42.

```
session {4/4 1:53:13pm > petr_zeleny opened job c:/program
files/prodigy/InsightV40/jobs/petr_zeleny/Default.sjb.
Insight 4.01 (2361).}
msg {1:53:14pm > Read 1864 facets in 0:00 from
"T:/_Prodigy/HONS/krabicka_.stl"}
msg {1:53:14pm > STL comment: solid KRABICKA_}
msg {1:53:14pm > Bounding box of this STL X, Y, Z:}
msg {1:53:14pm > min = (-40.9892, -18.0000, 0.0000)}
msg {1:53:14pm > max = (40.9892, 18.0000, 58.0000)}
msg {1:53:14pm > Done loading STL file after 1 sec.}
msg {1:54:04pm > Slice height: 0.2540}
msg {1:54:07pm > Done slicing.}
msg {1:54:08pm > Supports removed}
msg {1:54:08pm > Support style: Basic}
msg {1:54:08pm > Inspecting part curves}
msg {1:54:08pm > Generating supports}
msg {1:54:25pm > Done generating supports after 15 sec.}
msg {1:54:28pm > Done writing boundary curves after 2 sec.}
msg {1:54:28pm > Saved job:
T:/_Prodigy/HONS/ssys_krabicka_/krabicka_.sjb}
msg {1:54:28pm > Part fill style:Perimeter / rasters}
msg {1:54:28pm > Part interior style: Solid - normal}
msg {1:54:28pm > Contour width: 0.5080}
msg {1:54:28pm > Part raster width: 0.5080}
msg {1:54:36pm > Done generating toolpaths after 7 sec.}
msg {1:54:36pm > Part start (-0.082543, -0.078000) was
outside of modeling envelope; CMB moved to origin.}
msg {1:54:53pm > Toolpath Information}
msg {1:54:53pm > Est. build time: 3 hr 49 min }
msg {1:54:53pm > Model material: 28.47 cm3}
msg {1:54:53pm > Support material: 6.88 cm3}
msg {1:54:58pm > Done writing CMB file after 17 sec.}
msg {1:54:58pm > Job Summary}
msg {1:54:58pm > Full job path:
T:/_Prodigy/HONS/ssys_krabicka_/krabicka_.sjb}
msg {1:54:58pm > Toolpath file name: krabicka_.cmb.gz}
```

Obr.42 Ukázka vygenerovaných dat (stavba krabíčky bez víčka)

První zvýrazněné pole udává celkový čas stavby modelu, druhé pole udává množství použitého materiálu pro stavbu modelu a třetí množství podpůrného materiálu. Tyto údaje jsou rozhodující pro výpočet výsledné ceny zhotovení modelu.

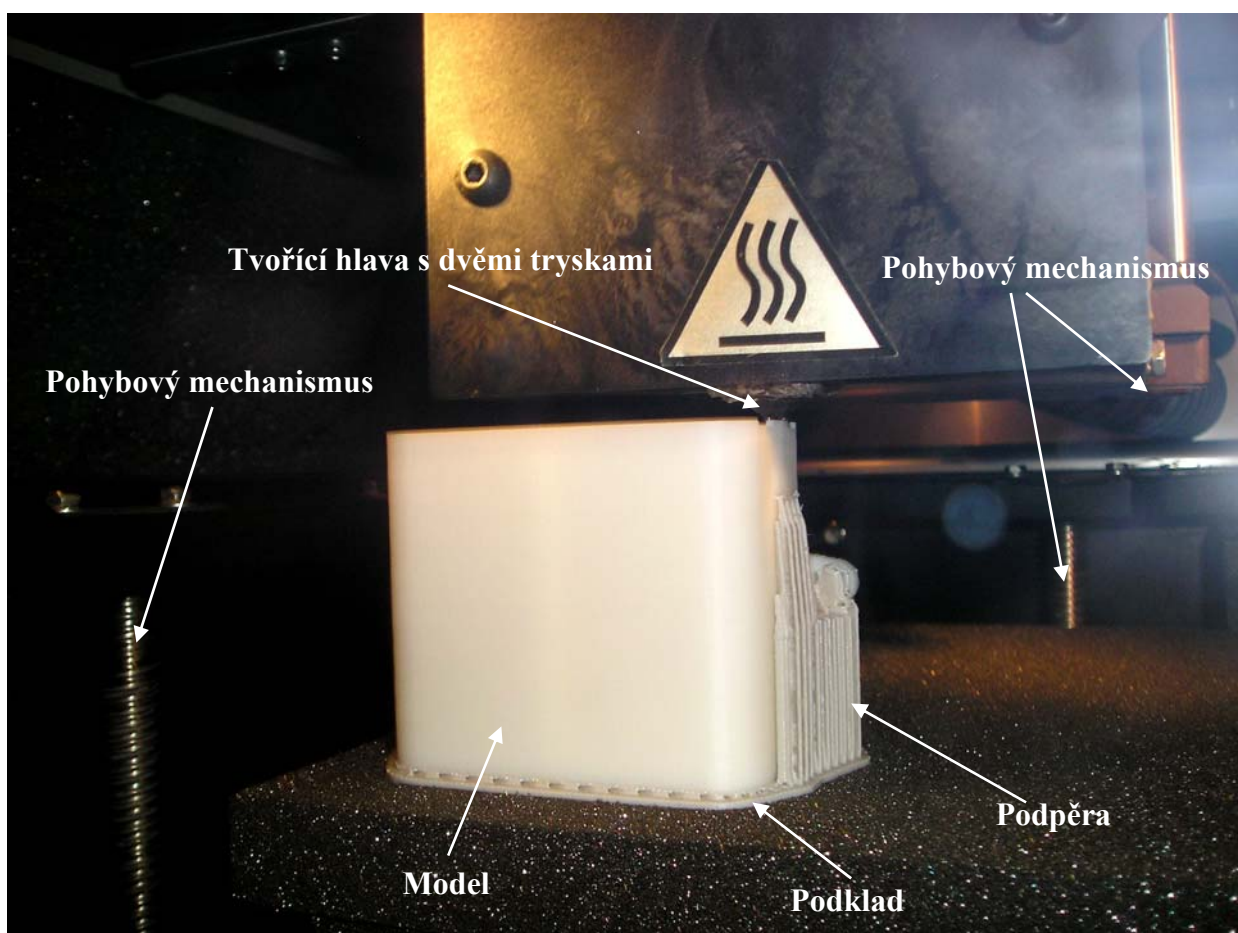
### 7.3. Vytvoření modelu metodou FDM.

Model byl vytvořen na stroji PRODIGY, viz obrázek 43. Na následujícím obrázku 44 je vidět nanášecí hlava obsahující dvě trysky. Jedna tryska nanáší materiál modelu a druhá nanáší podpurný materiál který je po vytvoření modelu potřeba ručně odstranit. Celý proces tvorby modelu je prováděn za konstantní teploty, aby materiál bylo možné nanášet v tekutém stavu a zároveň aby materiál mohl po nanesení bezpečně zchladnout.

Model, stůl a modelovací hlava  
Kazety s materiálem pro model a podpory

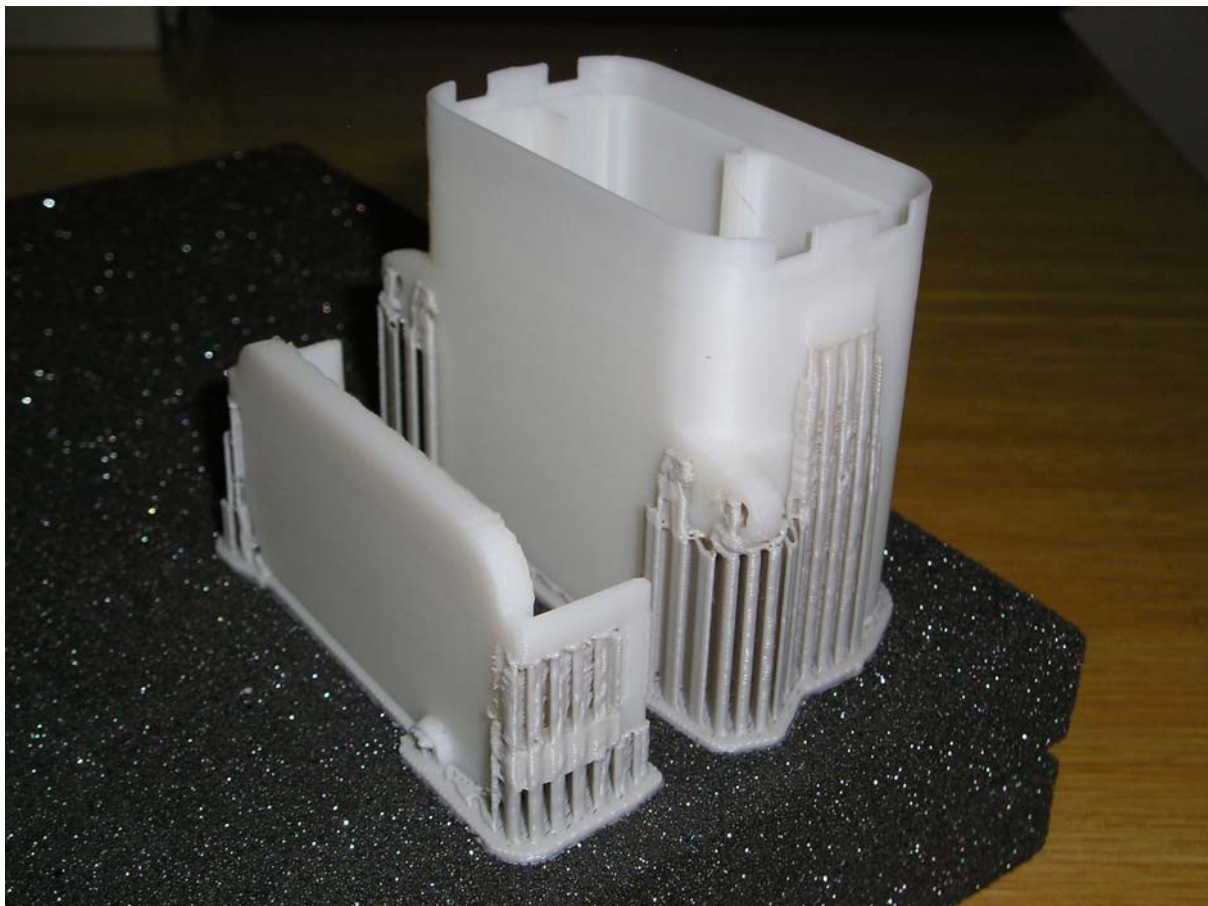


Obr.43 Stroj PRODIGY.



Obr.44 Nanášení materiálu strojem PRODIGY.





Obr.45 Vytvořený model krabičky a víčka metodou FDM včetně podpor.

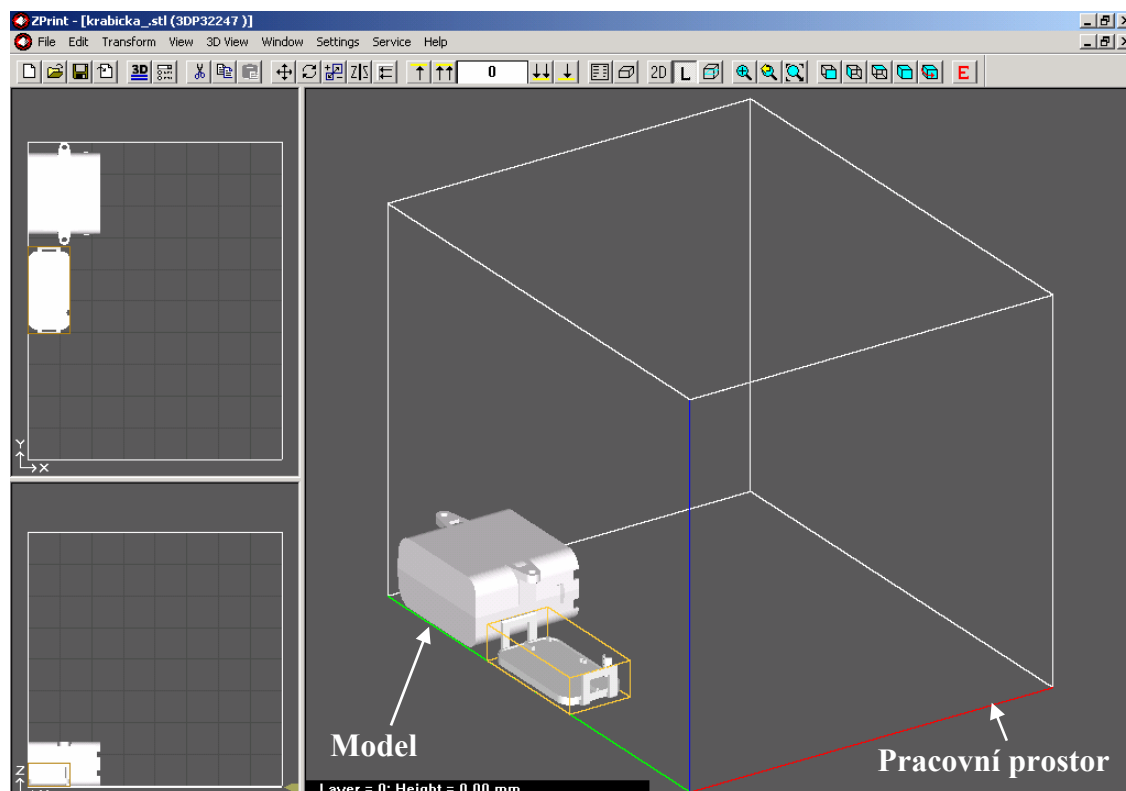
Model víčka byl z důvodu prověření odlišnosti tvoření vrstev vytvořen i v poloze naležato jak je znázorněno na obrázku 46.



Obr.46 Model víčka v poloze naležato včetně podpor.

## 7.4. Zpracování dat pro metodou 3DP.

Z důvodu porovnání vlastností dvou technologií byl model vytvořen i metodou 3DP. Vygenerovaná data STL byla zpracována programem ZPRINT který je uživatelskou součástí systému ZPrinter 310 Plus. Snímek z tohoto programu je na obrázku 47. Z obrázku je patrné umístění modelu do pracovního prostoru stroje. Výsledkem zpracování STL dat jsou data pro tvořicí stroj i data sloužící pro cenovou kalkulaci zhotoveného modelu. Ukázka dat je na obrázku 48.



Obr.47 Zpracování STL dat programem ZPRINT

```
Date: Tuesday, May 15, 2007
Build Name: C:\Documents and
Settings\Administrator\Plocha\Modely\krabicka_.stl
Printer Type: ZPrinter 310      Powder Type: ZB56/ZP102
Build Height: 36.00 mm      Layer Thickness: 0.1016 mm
Number of Layers: 354
Estimated build time: 1 hour and 0 minutes
Estimated binder usage: 35.2 ml
Total volume of parts: 35.58 cubic centimeters.
Total surface area: 351.51 square centimeters.
```

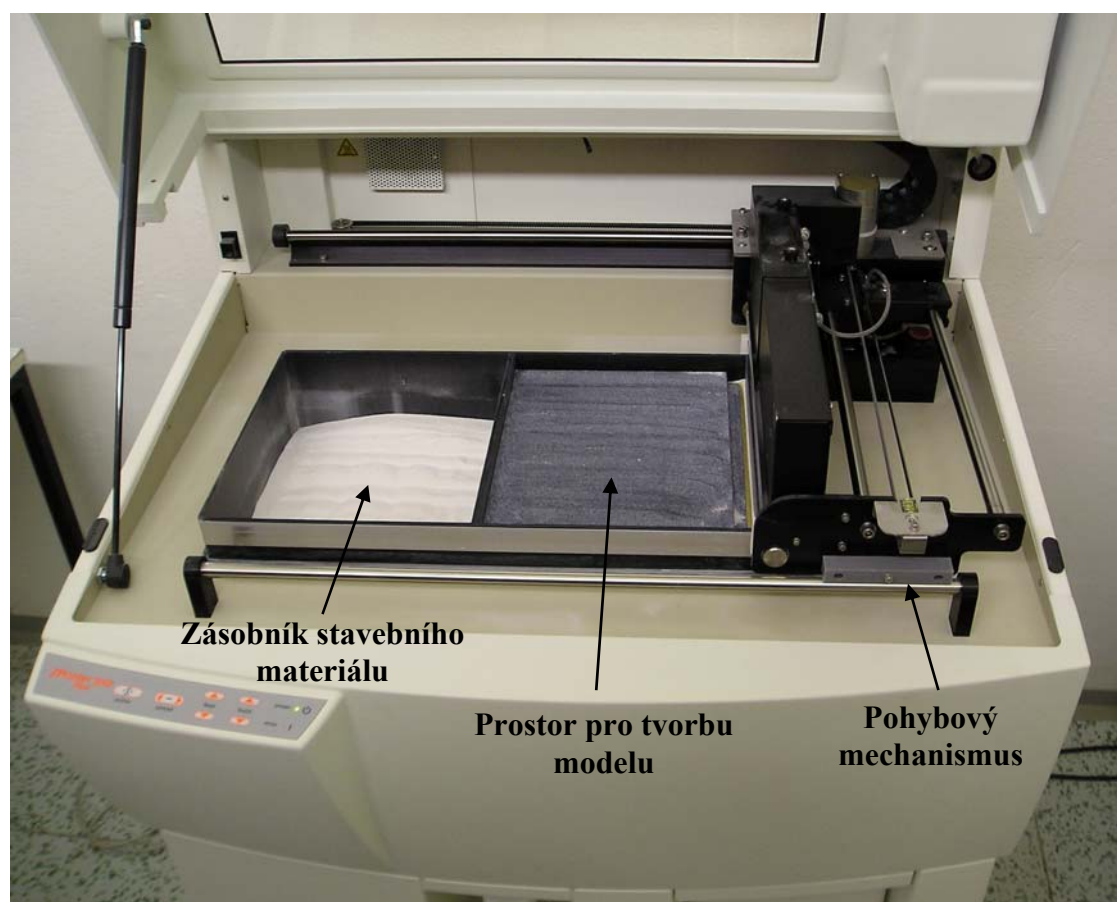
Obr.48 Vygenerovaná data o modelu programem ZPRINT

První zvýrazněné pole udává celkový čas stavby modelu, druhé pole udává množství použitého materiálu pro stavbu modelu. Tyto údaje jsou rozhodující pro výpočet výsledné ceny zhotovení modelu.

## **7.5. Vytvoření modelu metodou 3DP.**

Na obrázku 49 je zachyceno mechanické uspořádání stroje ZPrinter 310 Plus. Z obrázku je patrné umístění zásobníku stavebního materiálu (sádrového prášku zp130) ze kterého vzniká model. V sousední části je prostor se základní deskou na které vzniká hotový model. Pohybový mechanismus umožňující pohyb tiskové hlavy ve dvou osách nese tiskovou hlavu, která pomocí trysek vstřikuje zpevňující pojivo do stavebního materiálu. Tisková hlava je vyráběna firmou HP jako tisková hlava pro inkoustové tiskárny. V 3D tiskárně je místo inkoustu použito zpevňující kapalně pojivo.

Hotový model je vyzvednut ze sypkého materiálu, který sloužil jako podpora převislých částí a je zbaven přebytečného prášku v čistící komoře. Čistící komora je zobrazena na obrázku 51. Takto očištěný model je dále finálně ošetřen tekutým zpevňujícím pojivem pro dosažení větší tvrdosti a mechanické odolnosti povrchu. Pro výrobu tohoto modelu byl použit materiál na bázi sádry.



Obr.49 RP stroj ZPrinter 310 Plus





Obr.50 Celkový pohled na stroj ZPrinter 310 Plus



Obr.51 Stroj pro zbavení modelu přebytečného prášku



Obr.52 Vyhotovený model technologií 3DP

## 8. Porovnání vytvořených modelů metodou FDM a metodou 3DP.

Pro zvážení jakou RP metodu použít pro zhotovení modelu je rozhodující ekonomická náročnost i mechanické vlastnosti modelu včetně přesnosti zpracování a výsledný vzhled modelu. Použitá technologie tvorby modelu a materiál modelu udávají způsob použití tohoto modelu. Modely rozlišujeme na pohledové modely určené primárně pro prezentace či designérské práce a na modely pevnostní určené pro zástavbové a mechanické testy. Oba typy modelů lze použít i jako master model pro výrobu forem a odlitků.

### 8.1. Ekonomický rozbor tvorby modelů.

Vstupní parametry pro ekonomický rozbor vycházejí z informací o tvorbě modelů. Čas tvorby modelu a přípravy programu není zde zohledněn protože stroj pracuje samostatně bez obsluhy a doba přípravy je pro srovnávané metody stejná. Dále jsou zde z důvodu zjednodušení a z důvodu problematického zjištění zanedbány faktory odpisu, faktor úrokové míry, faktor údržby a oprav i faktor nákladů na energii. Využití stroje je uvažováno 80 % z jedné směny.

**Přehledová tabulka vstupních dat pro výpočet a ekonomickou rozvahu:**

Parametr	Označení	Jednotka	Metoda FDM	Metoda 3DP
Materiál modelu		-	ABS	zp130
Cena stroje	C	Kč	2 000 000	1 050 000
Náklady na zavedení stroje	N <sub>p</sub>	Kč	50 000	50 000
Doba odpisu stroje	D	rok	4	4
Čas na zpracování dat		hod	0,25	0,25
Kusový čas stroje	t <sub>k</sub>	hod	5,04	1
Čas na dokončovací operace		hod	0,5	1
Množství materiálu na model		cm <sup>3</sup>	35,6	35,6
Množství materiálu na podpory		cm <sup>3</sup>	10,3	0
Cena materiálu		Kč/kus	505	356
Cena materiálu pro konečné úpravy		Kč/kus	0	40
Celková cena materiálu	C <sub>m</sub>	Kč/kus	505	396
Počet pracovních dní v roce	P <sub>d</sub>	-	252	252
Počet směn provozu stroje	s	-	1	1
Doba jedné směny	t <sub>s</sub>	hod	8	8
Využití stroje za směnu	f <sub>v</sub>	-	0,8	0,8

Tabulka 3



**Výpočty:**

Efektivní časový fond stroje  $T_r = t_s \cdot P_d \cdot f_v \cdot s = 8 \cdot 252 \cdot 0,8 \cdot 1 = 1612,8$  (1)

Cena stroje připadající na 1 rok  $C_r = \frac{C + N_p}{D}$  (2)

Stroj 1 (FDM)  $C_{r1} = \frac{C_1 + N_{p1}}{D_1} = \frac{2000000 + 50000}{4} = 512500$

Stroj 2 (3DP)  $C_{r2} = \frac{C_2 + N_{p2}}{D_2} = \frac{1050000 + 50000}{4} = 275000$

Hrubá srovnávací sazba stroje  $S_s = \frac{C_r}{T_r}$  (3)

Stroj 1 (FDM)  $S_{s1} = \frac{C_{r1}}{T_{r1}} = \frac{512500}{1612,8} = 317,77$

Stroj 2 (3DP)  $S_{s2} = \frac{C_{r2}}{T_{r2}} = \frac{275000}{1612,8} = 170,51$

Hrubé výrobní náklady na 1 ks  $S_{sc} = t_k \cdot S_s + C_m$  (4)

Stroj 1 (FDM)  $S_{sc1} = t_{k1} \cdot S_{s1} + C_{m1} = 5,04 \cdot 317,77 + 505 = 2106,56$

Stroj 2 (3DP)  $S_{sc2} = t_{k2} \cdot S_{s2} + C_{m2} = 1 \cdot 170,51 + 396 = 566,51$

Počet možných vyrobených kusů za 1 rok při práci na 1 směnu  $K_s = \frac{T_r}{t_k}$  (5)

Stroj 1 (FDM)  $K_{s1} = \frac{T_{r1}}{t_{k1}} = \frac{1612,8}{5,04} = 320$

Stroj 2 (3DP)  $K_{s2} = \frac{T_{r2}}{t_{k2}} = \frac{1612,8}{1} = 1612$  (zaokrouhleno dolů)

**Tabulka vypočtených hodnot:**

Parametr	Označení	Jednotka	Metoda FDM	Metoda 3DP
Efektivní časový fond stroje	Tr	hod	1612,8	1612,8
Cena stroje připadající na 1 rok	Cr	Kč	512 500	275 000
Hrubá srovnávací sazba stroje	Ss	Kč / hod	317,77	170,51
Hrubé výrobní náklady na 1 ks	Ssc	Kč / ks	2106,56	566,51
Počet možných vyrobených kusů za 1 rok při práci na 1 směnu	Ks	ks / rok	320	1612

Tabulka 4

Z porovnávací tabulky lze vyhodnotit že cena vyrobeného modelu metodou FDM z materiálu ABS je zhruba 3,7x větší než cena téhož modelu vyrobeného technologií 3DP z materiálu zp130. Dále je vidět že stroj 3DP vyrobí za rok přibližně 5x více těchto modelů než stroj FDM.

K těmto informacím je třeba přistupovat s vědomím že šlo o srovnání cenové náročnosti za zcela specifickým podmínek. Protože oba stroje dovedou stavět najednou i více modelů, záleží pak v reálné praxi na schopnosti zefektivnit tento výrobní proces. V této cenové kalkulaci dále nebyly zohledněny nároky na energii a mzdu protože tyto faktory jsou velmi závislé na managementu konkrétního pracoviště.

Vyjádřit návratnost vložených investic do zakoupení RP stroje je velmi obtížné z důvodu vlivu mnoha faktorů. Stupeň využití stroje je závislý na požadavcích a možnostech zákazníka. Dále je nutné vzít v úvahu potřebnost a vhodnost dané technologie pro zákazníka. Pro různé použití modelů je nezbytné posoudit vhodnost materiálu pro který je různá technologie zhotovení modelů. Často je vhodné obstarat výrobu modelů formou zakázky od subjektů které vlastní konkrétní technologii vzhledem k vysoké ceně zařízení a možnému malému využití u pořizovatele. Nelze tedy zde naprosto jednoznačně určit návratnost vložených investic protože to zcela souvisí s konkrétními požadavky zákazníka.

## **8.2. Rozbor vlastností zhotovených modelů.**

Kromě ekonomického posouzení tvorby modelů jsou důležitými faktory i přesnost a mechanické vlastnosti materiálu i modelu. Pokud model slouží pouze pro prezentaci nezáleží tolik na jeho přesnosti a mechanických vlastnostech jako na jeho vzhledu případně i na jakosti povrchu. Je-li model určen pro zkoušky které kladou důraz na mechanické vlastnosti je důležité aby model byl dostatečně pevný i pružný. Pokud je model použit pro zkoušky výrobku je důležité aby měl model obdobné vlastnosti jako sériově vyráběný díl, tj. byl rozměrově přesný a měl definované mechanické vlastnosti. Například bude-li sériově vyráběný díl vyráběn vstřikováním plastu do formy je žádoucí aby RP model měl mechanické vlastnosti co nejbližší podobné výslednému produktu tedy vlastnosti podobné plastu.

### **Vlastnosti Modelu vytvořeného technologií FDM z materiálu ABS.**

Model je tvořen nanášením vytlačovaného vlákna nataveného plastu ABS. Povrch modelu částečně kopíruje nanášené vrstvy, na šikmých plochách jsou stupně více patrné což je způsobeno tloušťkou kladených vrstev 0,254 mm. Pro zmenšení drsnosti může být povrch ošetřen rozpouštědlem. Model je dostatečně pevný i pružný a vhodný pro zástavbové zkoušky i zkoušky mechanické které nárokuje dostatečnou pevnost i pružnost. Model je vhodný pro použití jako master model pro zhotovení silikonové formy.

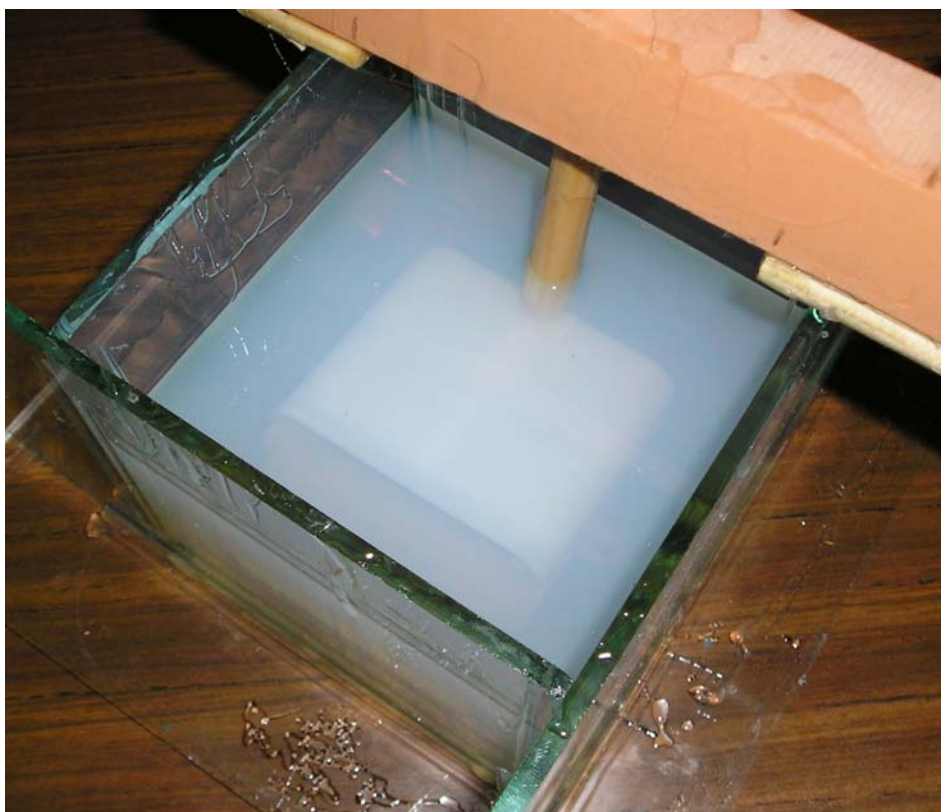
Model krabičky a víčka byl vyroben najednou. Víčko bylo vyrobeno ve dvou polohách a to v poloze kdy byla základna rovnoběžná se stolem stroje (obr.46 / strana 69) a v poloze kdy základna víčka byla kolmá na stůl stroje (obr.45 / strana 69). Tyto dvě varianty polohování víčka byly užity z důvodu že se liší způsobem kladení vrstev a tedy vnitřní strukturou. Části modelu které jsou náchylnější na ulomení jsou pevnější pokud jsou tyto části tvořeny z menšího počtu vrstev, protože pevnost spojených vrstev je menší než pevnost nanášeného vlákna. Na druhou stranu model tvořený v poloze kdy je jeho základna kolmá na stůl stroje potřebuje menší množství podpůrného materiálu. Toto lze shrnout tak že poloha modelu při jeho tvoření ovlivňuje pevnost tenkých částí a má vliv na množství spotřebovaného podpůrného materiálu. Víčko u kterého byla základna kolmá na stůl stroje (obr 45 / strana 69) má pevnější výstupky a úchyty než druhé víčko (obr 46 / strana 69).

**Vlastnosti Modelu vytvořeného technologií 3DP z materiálu ZP130.**

Model je tvořen z jemného sádrového prášku zp130, který je spojen pojivem. Povrch modelu je tvrdý a drsný. Drobné výčnělky mohou být odstraněny při finální úpravě. Tvrdost povrchu je zvýšena použitým lakem při finální úpravě povrchu. Na vnitřní ploše modelu jsou patrné nerovnosti. Povrch se drolí pokud není zpevněn lakem. Materiál modelu je velmi křehký a hrozí možnost destrukce části modelu v závislosti na průřezu a tvaru. Model vykazuje jen velmi malou pružnost a vzhledem k jeho křehkosti není model vhodný pro zkoušky mechanických vlastností. Cena materiálu a technologie je velmi příznivá. K této skutečnosti a k možnosti tisku v barvách jsou tyto modely z materiálu ZP130 vhodné především jako vizuální modely.

## 9. Tvorba odlitků v silikonové formě.

Model krabičky vytvořený technologií FDM byl použit pro výrobu silikonové formy. Model byl umístěn do prostoru vytvořené nádoby včetně uchycení, které zanechá potřebný tvar vtokového kanálku. Materiál pro výrobu silikonové formy byl použit dvousložkový SILASTIC T-4 v množství 715g (složka A 650g, složka B 65g, doba zpracování max. 90 min, doba odformování 12 hodin. ). Po procesu vakuování pro zbavení hmoty bublin byl materiál nalit do formy s modelem. Na obrázku 53 je model zalitý silikonovou hmotou.



Obr.53 Zhotovení silikonové formy

Po vytvrzení silikonové formy byla forma vyjmuta z nádoby a rozdělena na 3 části tak aby bylo možné vyjmout model a bylo možné opět sestavit formu s dostatečnou přesností. Dělení formy je zobrazeno na obrázku 54. Na obrázku 55 je zachycena rozdělená forma. Je zde patrné uspořádání formy které tvoří jádro a 2 díly vnější skořepiny. Nerovnosti v řezu formy napomáhají přesnému opětovnému složení formy.



Obr.54 Dělení formy



Obr.55 Silikonová forma

Po sestavení silikonové formy byly vytvořeny odtokové kanálky jejichž charakter a umístění ovlivňují odvod bublin z tuhnoucího materiálu odlitku. Běžně používané materiály pro odlévání do silikonové formy ukazuje tabulka 5. Jejich škála je velká a lze provést selektivní výběr dle požadovaných vlastností materiálu.

**Používané materiály pro odlévání do silikonové formy:**

Označení	Materiál/ vlastnost	hustota [g/cm <sup>3</sup> ]	mix.poměr	doba zpracování	doba odformování	temperace	barva/ poznámka
SILASTIC T-4	silikon	1,1	100/10tuž.	90min (23°C)	12hod (23°C)	není	
MG 709/A+B	PP	1,04	100A/90B	8-12min (20°C)	2-3hod (23°C)	5-6h při 60-80°C	průzračná
MG 703/Z400	PP/PE	1,12	100/31tuž.	8-12min (20°C)	40-45min (50°C)	12h při 100°C	bílá
GM 900/A+B	pryž	1,2	100/10tuž.	50-60min (20°C)	16-24hod (23°C)	není	*
GM 951/A+B	pryž	1,25	100/10tuž.	25-30min (20°C)	2-5hod (23°C)	není	
GM 975/A+B	otěruodolná	1,07	100/36tuž	12-15min (20°C)	12-16hod (23°C)	není	žlutá
MG 805/A+B	ABS	1,16	100/70tuž	5-7min (20°C)	90-120min (75°C)	2h při 100°C	černá
MG 805-1	ABS	1,16	100/70tuž	5-7min (20°C)	90-120min (75°C)	1h při 100°C 2h při 120°C	černá

\* lze míchat složky A pro ovlivnění tvrdosti směsi

Tabulka 5

Pro zhotovení odlitku byly vybrány dva materiály a to MG703 (bílá barva) a MG 709 (čirá barva). V tabulce 6 je uvedeno množství použitého materiálu na zhotovení formy i odlitků, informace o cenách materiálů a potřebného času na zhotovení dílu (doba použití vakuové komory a doba potřebná pro odlití).

**Informační tabulka o výrobě formy i odlitků:**

Zhotovený díl	materiál				strojní čas [hod]	manuální práce [hod]
	typ	množství [g]	Cena za 1 kg [Kč/kg]	Cena dílu [Kč]		
Forma	SILASTIC T-4	715	530	379	0,5	1
1. Odlití modelu	MG703-bílý	50	659	33	0,3	0,3
2. Odlití modelu	MG709-čirý	50	1202	60	0,3	0,3

Tabulka 6

Smíchání dvou složek materiálu bylo provedeno ve vakuové komoře jak je naznačeno na obrázku 56. Na obrázku 57 jsou pro porovnání zachyceny modely vytvořené technologií 3DP, FDM a odlité modely.



Obr.56 Odlévání ve vakuové komoře



Obr.57 Modely vytvořené metodou 3DP, FDM a dva odlitky.

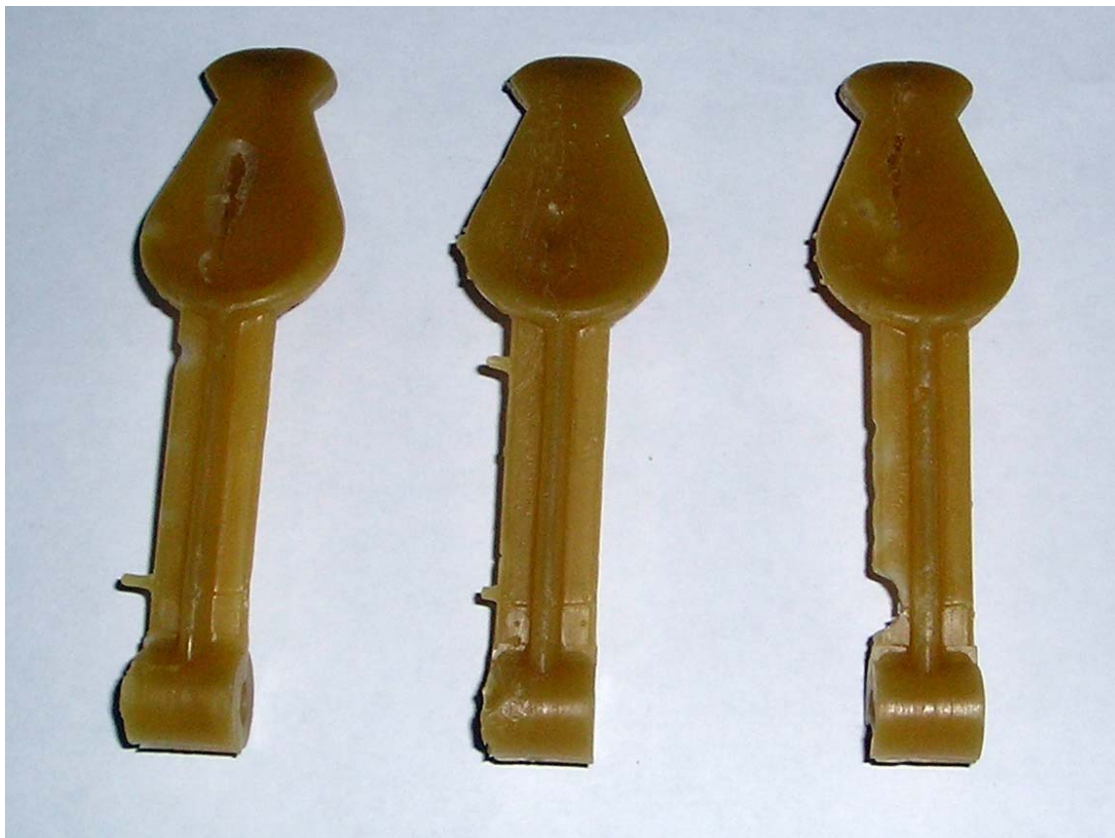
Oba odlitky mají podobné mechanické vlastnosti které se blíží vlastnostem plastových odlitků. Povrch těchto vytvořených odlitků věrně kopíruje povrch původního master modelu včetně jeho nerovností. Na nepřesnosti odlitků se projevila drobná nepřesnost sesazení silikonové formy. Je nutné odstranit pozůstatky vtokového kanálku a průduchy pro odvod bublin. Přestože rozmístění průduchů by mělo maximálně eliminovat množství bublin v odlitku jsou občas ve vytvořených odlitcích patrné bubliny. Toto je nezbytné odzkoušet. Před odléváním čirého modelu (druhý odlitek) byly do formy vytvořeny nové průduchy a množství bublin se výrazně snížilo.

Tato technologie výroby odlitků je v praxi použitelná pro malé série, kde cena výroby kovové formy je vzhledem k vyrobenému množství kusů vysoká. Proces výroby odlitků pomocí silikonové formy lze v procesu výroby zefektivnit například použitím vícenásobné formy kdy je několik odlitků odlito současně. Tímto způsobem by klesl výrobní čas připadající na jeden odlitek.



## **10. Tvorba kovových odlitků.**

V přecházející kapitole byl popsán proces tvorby odlitků v silikonové formě. Použitý model krabičky není vhodný pro odlévání z kovu z důvodu tenkých stěn. Proto pro odlévání z kovu byla použita předloha voskového modelu. Voskové modely jsou zobrazeny na obrázku 58. Vlivem silné tvorby bublin ve vosku při tvorbě těchto modelů a vlivem teplotní roztažnosti vosku vznikly v modelech tvarové poruchy které byly ručně opraveny.



Obr.58 Voskové modely.

Cílem bylo využití voskových modelů k zaformování a následné tvorbě kovového odlitku.

**Byly použity 3 technologie tvorby odlitku:**

- A) Zaformování do písku s vytavením modelu přímým litím kovu na model.
- B) Zaformování do písku s vytavením modelu temperováním při teplotě  $130\div 150^{\circ}\text{C}$
- C) Zaformování do sádky s vytavením modelu temperováním při teplotě  $130\div 150^{\circ}\text{C}$

Metoda **A** nelze použít protože tekutý kov nestačí odtavit vosk a zatéct postupně do celé formy. V metodě **B** při temperaci a odtavení voskového modelu se tvar v písku zhroutil a forma se stala nepoužitelnou. V metodě **C** se při temperaci vosk vsákl do sádrové formy a před odlitím se forma rozpadla pravděpodobně namáháním vyvolaným pnutím při změně teploty.

Schůdným řešením se jeví pouze metoda formování do silikátové skořepiny, tj. namočení do kaše tvořené směsí křemičitého písku a etylsilikátového pojiva. Tato hmota se při temperování dostatečně zpevní a snese odlévání různých slitin.

## **11. Závěr.**

Tato studie v sobě shrnuje postupy a technologie používané v oblasti vývoje rychlého prototypování. Dále shrnuje technické a cenové zhodnocení některých použitých technologií.

V průběhu této studie bylo vyhotoveno několik modelů různými technologiemi. Tyto modely byly zhodnoceny z hlediska vizuálního, mechanického i z hlediska finanční náročnosti. Je mnoho výrobců a distributorů zařízení pro rapid prototyping a každý upřednostňuje svoji technologii. Každá technologie má své přednosti i svá úskalí a každá technologie má i jiné vhodné použití. U pohledových modelů můžeme upřednostňovat jejich vizuální koncepci včetně pestrobarevného vzhledu. U modelů pro funkční zkoušky jsou důležitými parametry především fyzikální vlastnosti a u modelů sloužících jako master modely pro formování a lítí jsou důležité jejich fyzikální i technologické vlastnosti. Pro použití jakékoliv rapid prototyping technologie jsou důležité nejen znalosti jejich metod ale také technologické zkušenosti, které jsou pro dané metody specifické.

Tato studie napomáhá v rychlé orientaci ve stále se rozšiřujících a zdokonalujících technologiích a ve výběru vhodnosti jejich použití. Cílem této studie nebylo časově a cenově velmi nákladné prověření každé dnes známé technologie, ale ucelení poznatků a prověření v praxi používaných technologií rapid prototyping vhodných pro malé, střední a velké firmy. Tato práce ověřila teoretické znalosti a přinesla praktické zkušenosti z problematiky rychlého vývoje prototypů.

Věřím že vynaložené množství úsilí a finančních prostředků na vyhotovení této studie poslouží nejen podnikatelským subjektům ve svém rozvoji a zavádění nových technologií včetně inovačních procesů do své praxe ale také poslouží i k dalšímu rozvoji technologií rapid prototyping.

**Seznam použité literatury.**

- [1] CHUA.CH.K.-LEONG,K.F.: Rapid Prototyping.  
Singapore 1997, ISBN 0-471-19004-7
  
- [2] TLUSTY.J.: Manufacturing Processes and Equipment.  
Prentice Hall, NY 2000, ISBN 0-201-49865-0
  
- [3] I.MAŠÍN, L.ŠEVČÍK: Metody inovačního inženýrství.  
Institut technologií a managementu s.r.o. Liberec 2006, ISBN 80-903533-0-4
  
- [4] Jacobs, Paul F.: Stereolithography and other RP&M technologies  
New York, ASME Press 1996, ISBN 0-87263-467-1
  
- [5] Poznámky z přednášek TUL.

## **Internetové odkazy.**

<http://helisys.com>  
[http://home.att.net/~castleisland/rm\\_c.htm](http://home.att.net/~castleisland/rm_c.htm)  
<http://home.att.net/~castleisland/sl.htm>  
<http://home.utah.edu>  
<http://interpro-rtc.com>  
<http://intl.stratasys.com>  
<http://robo.hyperlink.cz>  
<http://www.1zu1prototypen.com>  
<http://www.2objet.com>  
<http://www.3dsystems.com>  
<http://www.3trpd.co.uk>  
<http://www.aaroflex.com>  
<http://www.bibus.cz>  
<http://www.cadcamnet.com>  
<http://www.contex.com>  
<http://www.cubital.com>  
<http://www.designtech.cz>  
<http://www.deskartes.com>  
<http://www.ems-usa.com>  
<http://www.hacker-model.com/cz>  
[http://www.kiracorp.co.jp/EG/index\\_ex.htm](http://www.kiracorp.co.jp/EG/index_ex.htm)  
<http://www.mackprototype.com>  
<http://www.mcae.cz>  
<http://www.rapidprototyping.net>  
<http://www.sanders-prototype.com>  
<http://www.solidvision.cz>  
<http://www.stereolithography.com>  
<http://www.tecnotrade.cz>  
<http://www.time-compression.com>  
<http://www.t-support.cz>  
<http://www.zcorp.com>  
<http://www.zsolutions.eu.com>

**Seznam příloh a modelů.**

- [1] CD s diplomovou prací a 3D virtuálním modelem
- [2] Model krabičky zhotovený technologií FDM z materiálu ABS
- [3] Model krabičky zhotovený technologií 3DP z materiálu ZP130
- [4] Odlitek krabičky z materiálu MG703
- [5] Odlitek krabičky z materiálu MG709
- [6] Silikonová forma krabičky